



**Nuno Henrique Riscado Barata**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

## **Comportamento à Tração de Compósitos de Matriz Inorgânica**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientador: Carlos Manuel Chastre Rodrigues,  
Professor Auxiliar, FCT UNL

Co-orientadora: Ana Rita Faria Conceição de Sousa Gião,  
Professora Adjunta, ISEL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Válder José da Guia Lúcio

Arguente: Prof. Doutor Hugo Emanuel da Costa Biscaia

Vogal: Prof. Doutor Carlos Manuel Chastre Rodrigues



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Março, 2018**



## **Comportamento à Tração de Compósitos de Matriz Inorgânica**

“Copyright” Nuno Henrique Riscado Barata, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.





# Agradecimentos

Ao longo da realização de todo o trabalho que culminou nesta dissertação tive a ajuda e a colaboração de várias pessoas a quem deixo o meu profundo agradecimento.

Ao meu orientador, Professor Carlos Chastre agradeço a atenção, disponibilidade e paciência no acompanhamento e esclarecimento de dúvidas. Agradeço também os conhecimentos e conselhos que me deu ao longo da realização deste trabalho e a sua exemplar orientação.

À minha coorientadora, a Professora Ana Rita Gião agradeço a disponibilidade que demonstrou em me ouvir e esclarecer as minhas dúvidas, as sugestões e conhecimentos que me prestou ao longo da dissertação.

Aos senhores Jorge Silvério e Vítor Silva pela enorme ajuda prestada ao longo da realização da campanha experimental e pela amizade, boa disposição e bom ambiente vivido nos laboratórios do DEC. O que me motivou e facilitou na execução e ensaio dos vários provetes.

À Empresa Secil e ao Eng. Vítor Vermelhudo por ter dispensado o cimento necessário à realização dos provetes de CRFU, à Empresa Favir por ter disponibilizado as fibras de aço aplicadas no sistema de CRFU. E à empresa SIKA e ao Eng. Rui Coelho por ter disponibilizado as argamassas utilizados nos provetes de TRM.

A todos os meus amigos, pelas experiencias partilhadas, momentos de convivência e pelo apoio e ajuda que sempre me deram durante a realização deste trabalho. Agradecer em especial ao Grilo, Ché, Faro e à Rita

Por fim, aos meus pais José e Rosa e a toda a minha família que eu tanto amo, que me apoiaram em todas as minhas decisões e deram sempre tudo o que tinham e o que não tinham para que eu pudesse ter sucesso. E que me moldaram na pessoa que sou hoje, agradeço-vos por tudo.



# Resumo

Recentemente, a utilização de fibras de reforço impregnadas por matrizes inorgânicas como material de reforço estrutural de elementos de betão e de alvenaria, denominados por Textile Reinforced Mortars (TRM), têm recebido grande destaque, em especial quando é necessário cumprir exigências específicas, como a aplicação de reforço em estruturas de importância cultural. Outro sistema de reforço recentemente desenvolvido foi a Calda Reforçada com Fibras Unidirecionais (CRFU), cujo principal objetivo é o reforço por encamisamento de pequena espessura de vigas e pilares.

Esta dissertação tem como objetivo o estudo do comportamento à tração de compósitos de matriz inorgânica. Tendo-se estudado para o efeito o comportamento dos sistemas de reforço TRM e CRFU. No sistema TRM consideraram-se diferentes matrizes (de origem cimentícia e de cal hidráulica natural) e diferentes quantidades de armadura de reforço (uma ou duas camadas), constituídas por fibra de carbono. No caso do sistema CRFU, foi considerada apenas a matriz cimentícia, mas diferentes volumes de fibra de aço unidirecionais (1, 2 e 3%). Para tal, realizaram-se 43 ensaios à tração uniaxial em provetes prismáticos após 28 dias de cura, 25 para o sistema de TRM e 18 para o sistema de CRFU.

Posteriormente aos ensaios, recorreu-se a um software de correlação de imagens digitais (DIC), o *GOM Correlate*, que permitiu obter o campo de deslocamentos e analisar a formação e abertura de fendas originadas ao longo do ensaio.

Da análise dos ensaios foi possível obter as curvas força-deslocamento e tensão-deformação, bem como os valores do módulo de elasticidade e da força, tensão e extensão na rotura dos provetes ensaiados. No final, com base nos resultados experimentais e em modelos existentes na literatura foi possível modelar o comportamento dos provetes ensaiados.

No sistema TRM, foi possível verificar que os provetes executados com uma argamassa de origem cimentícia, apresentam maior resistência e rigidez, bem como um melhor controlo da fendilhação, comparativamente aos provetes executados com argamassa de cal hidráulica natural. Como seria de esperar os provetes de ambas as séries apresentaram múltiplas fendas e um modo de rotura frágil.

No sistema CRFU, verificou-se que os provetes com 2% de fibra apresentam melhores resultados comparativamente aos provetes executados com 1% e 3%, sendo que todos os provetes ensaiados apresentaram apenas a formação de uma fenda visível ao atingir a rotura e constatando-se que a mesma é frágil.

## Palavras Chave

Caracterização Mecânica, Compósito, Fibra de Carbono, Fibras Unidirecionais, Matriz, Modelação, DIC



# Abstract

Recently textile reinforcement applied with inorganic matrices, also known as Textile Reinforced Mortars (TRM), have been receiving a great deal of attention as a strengthening material for concrete and masonry structures, especially when specific criteria must be met, such as the application of reinforcement in structures of cultural heritage. Another strengthening system was recently developed, the Unidirectional Fiber Reinforced Grout (UFRG), aiming to strengthening beams and columns. This composite was then tested to be mechanically characterized; it was also characterized as a confinement material in cylindrical columns.

This thesis focuses on the characterization of composites with inorganic matrices under uniaxial tensile stress. The strengthening systems studied were TRM and UFRG systems. The TRM strengthening system used different matrices (cement based, and lime based) and a different number of reinforcing layers (one and two layers) of carbon fiber. For the UFRG strengthening system only a cement based matrix was considered, but different volumes of steel fiber was used (1,2 and 3%). Therefore 43 uniaxial tensile tests were then made in prismatic specimens with 28-day curing time, 25 in TRM specimens and 18 in UFRG specimens.

After testing, a digital image correlation (DIC) software was used - *GOM Correlate*, that allowed the capture of the displacement field and analyse the pattern and width of the cracks that appeared during the tensile tests.

From the performed tests it was possible to determine the strength-displacements diagram, the tension-extension diagram, the young modulus and the ultimate load, stress and strain values. With the obtained results it was possible to modulate the behaviour of the tested specimens.

Regarding the TRM strengthening system, specimens which made with a cement based mortar, showed greater strength and stiffness, as well as a better cracking control, in comparison with the samples made with a lime-based mortar. Both series specimens showed several cracks and a brittle failure mode.

Regarding the results obtained from the UFRG, the specimens reinforced with 2% of steel fiber showed better results in terms of tensile strength in comparison with the specimens made with 1% and 3%. In all UFRG specimens a brittle fracture mode occurred and the formation of only one crack was noticed.

## Keywords

Mechanical Characterization, Composite, Carbon Fiber, Unidirectional Fibers, Matrix, Modeling, DIC



# Índice

<i>Agradecimentos</i> .....	<i>I</i>
<i>Resumo</i> .....	<i>III</i>
<i>Abstract</i> .....	<i>V</i>
<i>Índice de Figuras</i> .....	<i>IX</i>
<i>Índice de Tabelas</i> .....	<i>XII</i>
<i>Simbologia</i> .....	<i>XIV</i>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Enquadramento</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos da Dissertação</b> .....	<b>3</b>
<b>1.3. Estrutura da Dissertação</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Estado de arte</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1. Aspetos Gerais</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2. Fiber Reinforced Polymers (FRP)</b> .....	<b>6</b>
<b>2.3. Textile Reinforced Mortar (TRM)</b> .....	<b>8</b>
2.3.1. Fibras .....	14
2.3.2. Matriz.....	16
2.3.3. TRM sujeito a tração uniaxial .....	17
<b>2.4. Calda Reforçada com Fibras Unidirecionais (CRFU)</b> .....	<b>18</b>
<b>3. Campanha Experimental</b> .....	<b>27</b>
<b>3.1. Definição da campanha de ensaios</b> .....	<b>27</b>
3.1.1. Procedimento da caracterização mecânica das matrizes .....	28
3.1.2. Procedimento da caracterização mecânica da fibra de carbono .....	29
3.1.3. Execução dos provetes de TRM e CRFU.....	34
3.1.4. Cura dos provetes.....	38
3.1.5. Obtenção do campo de deslocamentos através da técnica DIC .....	41
3.1.6. Ensaios preliminares de tração uniaxial .....	43
3.1.7. Ensaios de tração uniaxial .....	44

<b>4.</b>	<b><i>Apresentação e discussão dos resultados</i></b>	<b>47</b>
4.1.	<b>Caracterização dos materiais</b>	<b>47</b>
4.1.1.	Caracterização mecânica das matrizes	47
4.1.2.	Caracterização mecânica da fibra de carbono	49
4.1.3.	Provetes não reforçados	53
4.2.	<b>Sistema de reforço TRM</b>	<b>54</b>
4.3.	<b>Sistema de reforço CRFU</b>	<b>65</b>
4.4.	<b>Análise do campo de deslocamentos</b>	<b>72</b>
<b>5.</b>	<b><i>Modelação</i></b>	<b>81</b>
5.1.	<b>Modelo Aveston Cooper Kelly (ACK)</b>	<b>81</b>
5.2.	<b>Cracking Model (CM)</b>	<b>84</b>
5.3.	<b>Modelo CRFU</b>	<b>87</b>
<b>6.</b>	<b><i>Conclusões e Desenvolvimentos Futuros</i></b>	<b>93</b>
6.1.	<b>Considerações finais</b>	<b>93</b>
6.2.	<b>Desenvolvimentos futuros</b>	<b>96</b>
	<b><i>Referências bibliográficas</i></b>	<b>97</b>
	<b><i>Apêndice A</i></b>	<b>103</b>
	<b><i>Apêndice B</i></b>	<b>113</b>



# Índice de Figuras

FIGURA 2.1 - APLICAÇÃO DE LAMINADOS DE FRP EM A) LAJES E EM B) SILOS INDUSTRIAIS .....	7
FIGURA 2.2 - APLICAÇÃO DE MANTAS DE FRP EM A) PILARES E B) VIGAS.....	7
FIGURA 2.3 – A) APLICAÇÃO DE RESINA EPOXÍDICA E B) DESTACAMENTO DE FRP EM VIGAS .....	8
FIGURA 2.4 - SISTEMA DE EXECUÇÃO DE TRM.....	9
FIGURA 2.5 - PROCESSO DE APLICAÇÃO DE TRM EM VIGAS .....	12
FIGURA 2.6 - INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA NO ENSAIO AO CORTE EM VIGAS .....	12
FIGURA 2.7 - PROCESSO DE CONFINAMENTO COM TRM DE BETÃO EM PROVETES CILÍNDRICOS .....	13
FIGURA 2.8 - CONFINAMENTO DE PILARES COM TRM.....	13
FIGURA 2.9 - APLICAÇÃO DE TRM EM A) PAREDES DE ALVENARIA E B) ARCOS.....	14
FIGURA 2.10 - MALHA DE FIBRAS DE CARBONO BIDIRECIONAL .....	15
FIGURA 2.11 - GRÁFICO TENSÃO-EXTENSÃO DE DIVERSAS FIBRAS DE REFORÇO .....	16
FIGURA 2.12 - GRÁFICO TENSÃO-EXTENSÃO TIPO DE UM SISTEMA TRM SUJEITO À TRAÇÃO .....	17
FIGURA 2.13 - MECANISMO ESQUEMÁTICO DA TRANSFERÊNCIA DE TENSÕES ENTRE A LIGAÇÃO FIBRA-MATRIZ, DAS ZONAS DE DESILZAMENTO, DAS TENSÕES SUPORTADAS PELA FIBRA E PELA MATRIZ .....	18
FIGURA 2.14 - PROCESSO DE PRODUÇÃO DAS MANTAS DE FIBRAS CONTÍNUAS E UNIDIRECIONAIS DE AÇO .....	19
FIGURA 2.15 – DIAGRAMA TENSÃO- DEFORMAÇÃO DOS ENSAIOS À TRAÇÃO DOS FIOS DE AÇO .....	20
FIGURA 2.16 - ANOMALIA EM PROVETE COM 4% DE VOLUME DE FIBRAS E RELAÇÃO $(A/C) = 0.28$ .....	21
FIGURA 2.17 - PREPARAÇÃO E IMPREGNAÇÃO COM CALDA DOS PROVETES CÚBICOS.....	21
FIGURA 2.18 - EXECUÇÃO DOS PROVETES TUBULARES .....	22
FIGURA 2.19 - ROTURA DAS VIGAS DE REFERÊNCIA .....	23
FIGURA 2.20 - ROTURA DA VIGA REFORÇADA POR SUBSTITUIÇÃO DO RECOBRIMENTO COM CRFU .....	23
FIGURA 2.21 - ROTURA DA VIGA REFORÇADA POR ENCAMISAMENTO COM CRFU .....	23
FIGURA 2.22 – GEOMETRIA DO REFORÇO POR ENCAMISAMENTO COM CRFU E PRÉ-ESFORÇO (VPEE) .....	24
FIGURA 2.23 – ESQUEMA DE ENSAIO E DE APLICAÇÃO DO PRÉ-ESFORÇO .....	24
FIGURA 2.24 – MODO DE ROTURA DOS MODELOS, ALÇADO LATERAL E ALÇADO FRONTAL DA ZONA CRÍTICA .....	25
FIGURA 2.25 - MODO CARACTERÍSTICO DA ROTURA .....	26
FIGURA 3.1 – EXECUÇÃO DOS PROVETES DE DIMENSÕES 160x40x40 MM .....	28
FIGURA 3.2 – ENSAIO À FLEXÃO DOS PROVETES DE DIMENSÕES 160x40x40 (MM) E À COMPRESSÃO DOS PROVETES DE DIMENSÕES 40x40x40 (MM).....	28
FIGURA 3.3 - REDE DE CARBONO BIDIRECIONAL <i>StoBPE NSMG44</i> .....	29
FIGURA 3.4 – PROCESSO DE EXECUÇÃO DOS PROVETES DE FIBRA DE CARBONO, A) E B) APLICAÇÃO DA RESINA, C) COLOCAÇÃO DAS CHAPAS METÁLICAS SUPERIORES, D) COLOCAÇÃO DOS PESOS ADICIONAIS .....	30
FIGURA 3.5 – A) VISTA GERAL DO ENSAIO DE TRAÇÃO DE FIBRA (1 FIO), B) MODO DE ROTURA DO PROVETE .....	31
FIGURA 3.6 – A) VISTA GERAL DO ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DE FIBRA (3 FIOS), B) MODO DE ROTURA DO PROVETE .....	31
FIGURA 3.7 – PROCESSO DE COLOCAÇÃO DO EXTENSÓMETRO, A) REMOÇÃO DA RESINA, B) EXTENSÓMETRO ELECTRICO UTILIZADO, C) E D) COLOCAÇÃO DO EXTENSÓMETRO NO PROVETE .....	32

FIGURA 3.8 – A) VISTA GERAL DO ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA, B), C), D) MODOS DE ROTURA DOS PROVETES.....	33
FIGURA 3.9 – A) COLOCAÇÃO DA FIBRA DE CARBONO, B), C), D) EXECUÇÃO DOS PROVETES DE TRM COM ARGAMASSA Sika	
<i>MONOTOP 612</i> .....	35
FIGURA 3.10 – A), B), C) EXECUÇÃO DOS PROVETES DE TRM COM ARGAMASSA SECIL REABILITA CAL, D) COLOCAÇÃO DOS PANOS	
HÚMIDOS.....	36
FIGURA 3.11 – PROCESSO DE EXECUÇÃO DA CALDA CIMENTÍCIA, A) MISTURA A SECO DO CIMENTO E SÍLICA, B) MISTURA DOS 10% DE	
ÁGUA E SUPERPLASTIFICANTE, C) COLOCAÇÃO DA CALDA PARA BETONAGEM DOS PROVETES .....	37
FIGURA 3.12 – PROCESSO DE EXECUÇÃO DOS PROVETES DE CRFU, A) COLOCAÇÃO DAS FIBRAS DE AÇO NA COFRAGEM, B), C), D)	
BETONAGEM DO PROVETE, E) COLOCAÇÃO DOS PANOS HÚMIDOS .....	38
FIGURA 3.13 – A) COLOCAÇÃO DOS PROVETES NO TANQUE DE CURA B) APARECIMENTO DE FERRUGEM NOS PROVETES DE CRFU, C)	
PROCESSO DE CURA DOS PROVETES E APARECIMENTO DE CORROSÃO NOS PROVETES DE CRFU .....	39
FIGURA 3.14 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO SOFTWARE <i>GOM CORRELATE</i> .....	41
FIGURA 3.15 – PROCESSO DE CRIAÇÃO DO PADRÃO ESTOCÁSTICO, A) APLICAÇÃO DO PRIMÁRIO, B) APLICAÇÃO DE TINTA PRETA, C)	
PADRÃO ESTOCÁSTICO OBTIDO.....	42
FIGURA 3.16 – SISTEMA DE CAPTURA DE FOTOGRAFIAS DOS PROVETES .....	43
FIGURA 3.17 – REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS PRELIMINARES DE TRAÇÃO UNIAXIAL.....	43
FIGURA 3.18 – GARRAS UTILIZADAS E PROCESSO DE NIVELAMENTO .....	44
FIGURA 3.19 – SISTEMA DE MEDIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS (OTIMIZADO) .....	44
FIGURA 3.20 – DISPOSIÇÃO GERAL DA INSTRUMENTAÇÃO DURANTE A CAMPANHA DE ENSAIOS.....	45
FIGURA 4.1 - GRÁFICO FORÇA-EXTENSÃO DOS PROVETES DE FIBRA DE CARBONO (3 FIOS) SUJEITOS A TRAÇÃO UNIAXIAL.....	49
FIGURA 4.2 - GRÁFICO FORÇA-EXTENSÃO DOS PROVETES DE FIBRA DE CARBONO (1 FIO) SUJEITOS A TRAÇÃO UNIAXIAL .....	50
FIGURA 4.3 - GRÁFICO FORÇA-EXTENSÃO DOS PROVETES DE FIBRA DE CARBONO SUJEITOS A TRAÇÃO UNIAXIAL (ANALISADOS COM	
EXTENSÓMETRO ELÉTRICO E COM O EXTENSÓMETRO MECÂNICO DA ZWICK) .....	51
FIGURA 4.4 – GRÁFICO FORÇA - EXTENSÃO DA SÉRIE Sk 0 .....	53
FIGURA 4.5 - ZONA DE ROTURA, PADRÃO E ESPAÇAMENTO DE FENDAS DA SÉRIE Sk 0.....	54
FIGURA 4.6 - GRÁFICO FORÇA - EXTENSÃO DA SÉRIE Sk - 1 .....	55
FIGURA 4.7 – GRÁFICO FORÇA - EXTENSÃO DA SÉRIE Sk - 2 .....	56
FIGURA 4.8 - COMPARAÇÃO ENTRE OS GRÁFICOS FORÇA - EXTENSÃO DAS SÉRIES Sk 1 E Sk 2 .....	56
FIGURA 4.9 – ZONA DE ROTURA, PADRÃO E ESPAÇAMENTO DE FENDAS DAS SÉRIES A) Sk 1 E B) Sk 2.....	58
FIGURA 4.10 - GRÁFICO FORÇA - EXTENSÃO DA SÉRIE Sl 1 .....	59
FIGURA 4.11 - GRÁFICO FORÇA - EXTENSÃO DA SÉRIE Sl 2 .....	60
FIGURA 4.12 – COMPARAÇÃO ENTRE OS GRÁFICOS FORÇA - EXTENSÃO DAS SÉRIES Sl 1 E Sl 2 .....	61
FIGURA 4.13 - ZONA DE ROTURA, PADRÃO E ESPAÇAMENTO DE FENDAS DAS SÉRIES A) Sl 1 E B) Sl 2 .....	62
FIGURA 4.14 - COMPARAÇÃO ENTRE OS GRÁFICOS FORÇA - EXTENSÃO DAS SÉRIES Sk 1 E Sl 1 .....	63
FIGURA 4.15 - ZONA DE ROTURA, PADRÃO E ESPAÇAMENTO DE FENDAS DAS SÉRIES A) Sk 1 E B) Sl 1.....	63
FIGURA 4.16 - COMPARAÇÃO ENTRE OS GRÁFICOS FORÇA - EXTENSÃO DAS SÉRIES Sk 2 E Sl 2.....	64
FIGURA 4.17 - ZONA DE ROTURA, PADRÃO E ESPAÇAMENTO DE FENDAS DAS SÉRIES Sk 2 E Sl 2 .....	64
FIGURA 4.18 – GRÁFICO FORÇA - EXTENSÃO DA SÉRIE CRFU 1% .....	66

FIGURA 4.19 – GRÁFICO FORÇA - EXTENSÃO DA SÉRIE CRFU 2% .....	67
FIGURA 4.20 – GRÁFICO FORÇA - EXTENSÃO DA SÉRIE CRFU 3% .....	68
FIGURA 4.21 - COMPARAÇÃO ENTRE OS GRÁFICOS FORÇA - EXTENSÃO DAS SÉRIES CRFU 1% E CRFU 2% .....	69
FIGURA 4.22 - COMPARAÇÃO ENTRE OS GRÁFICOS FORÇA - EXTENSÃO DAS SÉRIES CRFU 1% E CRFU 3% .....	69
FIGURA 4.23 - COMPARAÇÃO ENTRE OS GRÁFICOS FORÇA - EXTENSÃO DAS SÉRIES CRFU 2% E CRFU 3% .....	69
FIGURA 4.24 - ZONA DE ROTURA, PADRÃO E ESPAÇAMENTO DE FENDAS DAS SÉRIES A) CRFU 1%, .....	71
FIGURA 4.25 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS, (B) FORÇA-EXTENSÃO E (C) ABERTURA DE FENDAS - PROVETE SK-1-N3 .....	73
FIGURA 4.26 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS, (B) FORÇA-EXTENSÃO E (C) ABERTURA DE FENDAS - PROVETE SK-2-N3 .....	74
FIGURA 4.27 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS, (B) FORÇA-EXTENSÃO E (C) ABERTURA DE FENDAS - PROVETE SL-1-N5 .....	75
FIGURA 4.28 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS E (B) FORÇA-EXTENSÃO - PROVETE SL-2-N2 .....	76
FIGURA 4.29 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS, (B) FORÇA-EXTENSÃO E (C) ABERTURA DE FENDA - CRFU-1-N2 .....	77
FIGURA 4.30 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS, (B) FORÇA-EXTENSÃO E (C) ABERTURA DE FENDAS – CRFU-2-N6 .....	78
FIGURA 4.31 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS, (B) FORÇA-EXTENSÃO E (C) ABERTURA DE FENDAS - CRFU-3-N3 .....	79
FIGURA 5.1 – MODELO ACK COMPARADO À SÉRIE Sk 1 .....	83
FIGURA 5.2 - MODELO ACK COMPARADO À SÉRIE Sk 2 .....	83
FIGURA 5.3 – BLOCO DE BA SUJEITO À TRAÇÃO UNIAXIAL E RESPECTIVO COMPORTAMENTO MECÂNICO .....	84
FIGURA 5.4 - MODELO CM COMPARADO AO MODELO ACK (SÉRIE Sk 1) .....	86
FIGURA 5.5 - MODELO CM COMPARADO AO MODELO ACK (SÉRIE Sk 2) .....	86
FIGURA 5.6 - RELAÇÃO FORÇA-EXTENSÃO DAS FIBRAS DE AÇO CORRESPONDENTE A 1%, 2% E 3% DE ÁREA DE FIBRA .....	88
FIGURA 5.7 – MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CRFU EM FUNÇÃO DA PERCENTAGEM DE ARMADURA .....	88
FIGURA 5.8 - CRITÉRIO DE ROTURA DO MODELO CRFU EM FUNÇÃO DA PERCENTAGEM DE FIBRA DE AÇO .....	89
FIGURA 5.9 – MODELO CRFU COMPARADO À SÉRIE CRFU 1% .....	90
FIGURA 5.10 - MODELO CRFU COMPARADO À SÉRIE CRFU 2% .....	91
FIGURA 5.11 - MODELO CRFU COMPARADO À SÉRIE CRFU 3% .....	91
FIGURA 0.1 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS, (B) FORÇA-EXTENSÃO E (C) ABERTURA DE FENDAS - PROVETE SK-1-N1 .....	104
FIGURA 0.2 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS, (B) FORÇA-EXTENSÃO E (C) ABERTURA DE FENDAS - PROVETE SK-1-N2 .....	105
FIGURA 0.3 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS E (B) ABERTURA DE FENDAS - PROVETE SK-1-N4 .....	106
FIGURA 0.4 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS, (B) FORÇA-EXTENSÃO E (C) ABERTURA DE FENDAS - PROVETE SK-2-N1 .....	107
FIGURA 0.5 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS, (B) FORÇA-EXTENSÃO E (C) ABERTURA DE FENDAS - PROVETE SK-2-N2 .....	108
FIGURA 0.6 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS, (B) FORÇA-EXTENSÃO E (C) ABERTURA DE FENDAS - PROVETE SK-2-N5 .....	109
FIGURA 0.7 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS, (B) FORÇA-EXTENSÃO E (C) ABERTURA DE FENDAS - PROVETE SL-1-N3 .....	110
FIGURA 0.8 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS E (B) FORÇA-EXTENSÃO - PROVETE SL-2-N4 .....	111
FIGURA 0.1 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS, (B) FORÇA-EXTENSÃO E (C) ABERTURA DE FENDA – CRFU-1-N4 .....	114
FIGURA 0.2 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS, (B) FORÇA-EXTENSÃO E (C) ABERTURA DE FENDA – CRFU-2-N3 .....	115
FIGURA 0.3 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS, (B) FORÇA-EXTENSÃO E (C) ABERTURA DE FENDA – CRFU-2-N5 .....	116
FIGURA 0.4 – (A) CAMPO DE DESLOCAMENTOS E (B) FORÇA-EXTENSÃO – CRFU-3-N5 .....	117

# Índice de Tabelas

TABELA 2.1- CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS OBTIDAS DOS ENSAIOS À TRAÇÃO DOS FIOS DE AÇO .....	20
TABELA 3.1 – DESIGNAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS PROVETES EXECUTADOS .....	27
TABELA 3.2 - INFORMAÇÃO TÉCNICA DA REDE DE CARBONO <i>StoBPE NSMG44</i> .....	29
TABELA 3.3 – CARACTERÍSTICAS DOS PROVETES ENSAIADOS (DIMENSÕES E PESO).....	40
TABELA 4.1 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS PROVETES 160x40x40 MM DE ARGAMASSA <i>SIKA MONOTOP 612</i> .....	48
TABELA 4.2 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS PROVETES 160x40x40 MM DE ARGAMASSA <i>SECIL REABILITA CAL CONSOLIDAÇÃO</i> ....	48
TABELA 4.3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS PROVETES 160x40x40 MM DE CALDA CIMENTÍCIA .....	48
TABELA 4.4 - RESULTADOS OBTIDOS DE AMBAS AS CAMPANHAS DE ENSAIOS À TRAÇÃO DOS PROVETES DE FIBRA DE CARBONO .....	52
TABELA 4.5 – RESULTADOS DA SÉRIE Sk 0 .....	53
TABELA 4.6 - RESULTADOS DA SÉRIE Sk - 1 .....	55
TABELA 4.7 - RESULTADOS DA SÉRIE Sk - 2 .....	56
TABELA 4.8 - RESULTADOS DA SÉRIE Sl 1 .....	59
TABELA 4.9 - RESULTADOS DA SÉRIE Sl 2 .....	60
TABELA 4.10 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA SÉRIE CRFU 1%.....	66
TABELA 4.11 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA SÉRIE CRFU 2%.....	67
TABELA 4.12 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA SÉRIE CRFU 3%.....	68
TABELA 5.1 - PARÂMETROS DO MODELO ACK REFERENTES ÀS SÉRIES Sk-1 E Sk-2.....	82
TABELA 5.2 - PARÂMETROS DO MODELO CM REFERENTES ÀS SÉRIES Sk-1 E Sk-2 .....	86
TABELA 5.3 - RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DA CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE AÇO.....	87
TABELA 5.4 - FORÇA DE FENDILHAÇÃO DO CRFU .....	89



# Simbologia

## Letras romanas

$E_f$	Módulo de elasticidade da fibra de carbono
$E_{mu}$	Módulo de elasticidade da matriz
$E_{comp}$	Módulo de elasticidade do compósito de CRFU
$E_{t III}$	Módulo de elasticidade da fase 3 dos provetes de TRM
$E_{c1}$	Rigidez do compósito
$f_{su}$	Tensão de rotura no aço
$f_c$	Tensão de rotura à compressão
$f_f$	Tensão de rotura à flexo-tração
$f_{fk}$	Resistência à tração da fibra de carbono
$E_f$	Módulo de elasticidade da fibra de carbono
$E_{mu}$	Módulo de elasticidade da matriz
$E_{comp}$	Módulo de elasticidade do compósito de CRFU
$E_{t III}$	Módulo de elasticidade da fase 3 dos provetes de TRM
$E_{c1}$	Rigidez do compósito
$r$	Raio da fibra de carbono
$t_f$	Espessura da fibra de carbono
$t_p$	Espessura do provete
$l_p$	Largura do provete
$F_{mu}$	Força última da matriz
$F_t$	Força última do têxtil
$V_f$	Fração volumétrica de fibra de carbono
$V_m$	Fração volumétrica de matriz
$W$	Peso dos provetes
$W_{med}$	Peso médio dos provetes

## Letras gregas

$\varepsilon_{su}$	Extensão de rotura do aço
$\varepsilon_{sum}$	Valor médio da extensão de rotura do aço
$\varepsilon_{sr}$	Valor de extensão máxima do aço
$\varepsilon_f$	Extensão última da fibra de carbono
$\sigma_{mu}$	Tensão última da matriz
$\varepsilon_{mu}$	Extensão última da matriz

$\delta_{mu}$	Deslocamento máximo da matriz
$\sigma_t$	Tensão última do têxtil
$\varepsilon_t$	Extensão última do têxtil
$\delta_t$	Deslocamento máximo do têxtil
$\alpha_e$	Coeficiente de homogeneização
$\tau$	Tensão de corte

### **Siglas**

ACI	American Concrete Institute
ACK	Modelo analítico Aveston Cooper Kelly
CM	Modelo analítico Cracking Model
CRFU	Calda de cimento reforçada com fibras unidirecionais
CRFU 1%	Provetes de CRFU com 1% fibras unidirecionais
CRFU 2%	Provetes de CRFU com 2% fibras unidirecionais
CRFU 3%	Provetes de CRFU com 3% fibras unidirecionais
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão para Normalização)
INE	Instituto Nacional de Estatística
FRC	Fiber reinforced concrete
FRP	Fiber reinforced polymer
Sk	Série de provetes de TRM executados com argamassa Sika Monotop 612
Sk 1	Provetes de TRM executados com argamassa Sika e uma camada de reforço
Sk 2	Provetes de TRM executados com argamassa Sika e duas camadas de reforço
Sl	Série de provetes de TRM executados com argamassa Secil Reabilita Cal Consolidação
Sl 1	Provetes de TRM executados com argamassa Secil e uma camada de reforço
Sl 2	Provetes de TRM executados com argamassa Secil e duas camadas de reforço
TRM	Textile reinforced mortar
UV	Radiação ultravioleta





# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

O betão armado é, provavelmente, o material mais utilizado no mundo ao nível da construção civil atualmente, tendo-se verificado um crescimento anual na produção mundial de betão sobretudo devido a países como a China, Índia, Brasil, Estados Unidos da América e Rússia, com um aumento aproximado de 67% entre 2005 e 2010, e cerca de 78% entre 2010 e 2016 [USGS,2017].

Contudo em Portugal, verificou-se um decréscimo na produção de betão a partir do ano de 2008, que poderá ser justificado, em parte, pela crise económica ainda vívida no País, bem como pela aposta na reabilitação de construções antigas em detrimento da construção de novos edifícios, o que tem dado força à utilização de novos materiais de construção [Engenharia&Construção, 2011]. Em 2016, foram licenciados em Lisboa 415 projetos em 2016, sendo que 90% dos quais são projetos de reabilitação [Maria Antunes & Maribela Freitas, Expresso, 2016]. Independentemente deste decréscimo o betão continua a ter um grande peso a nível nacional.

Apesar das suas propriedades de resistência e durabilidade, existem vários fatores que levam a que o betão perca as suas propriedades iniciais, tais como as ações mecânicas (cargas aplicadas ou deformações impostas que possam danificar as estruturas, abrasão, entre outros), erros de projeto, de execução, de utilização e de manutenção, ações biológicas (fungos, plantas, entre outros), ações químicas que possam destruir a massa do betão endurecido ao longo do tempo (reação alcalis-inertes e sulfatos) ou que reduzam a capacidade do betão de proteger as armaduras contra a corrosão (ataques de cloretos e carbonatação do betão), entre outros fatores [Sebenta de betão I, 2014/2015]. Quando um ou mais destes fatores coloca em risco os edifícios e infraestruturas que tem na sua construção este material, torna-se necessário reabilitar/reforçar os mesmos.

Na atualidade, e como já foi referido, existe um maior foco na reabilitação e reforço estrutural do que na construção de novas infraestruturas, sendo que grande parte desse foco se debruça em determinar formas de melhorar o comportamento sísmico das mesmas. A nível nacional, sabe-se que existe um elevado risco sísmico sobretudo ao nível da costa Algarvia, na Madeira, nos Açores, e nas zonas de Setúbal e Lisboa, tendo estas últimas sido afetadas pelo trágico sismo de 1755. Segundo Mário Lopes. *“Istambul, na Turquia, é a única cidade europeia pior do que Lisboa a nível de risco sísmico elevado...”*. Por este motivo torna-se necessário reforçar as estruturas que apresentem um dimensionamento sísmico defeituoso ou mesmo inexistente, bem como reabilitar as que se encontram degradadas, de modo a que se possa salvaguardar um maior número de vidas e bens materiais.

Esta necessidade promoveu o desenvolvimento e estudo de vários sistemas de reforço e reabilitação que, de forma a poderem vingar é fundamental possuírem vantagens a nível de aplicação,

resistência mecânica, sustentabilidade, durabilidade e de serem viáveis a nível económico. Alguns destes sistemas serão analisados mais pormenorizadamente ao longo desta dissertação, designadamente a Calda Reforçada com Fibras Unidireccionais (CRFU) e o Textile Reinforced Mortar (TRM), no qual se utilizaram argamassas distintas como matriz do sistema (argamassa cimentícia e cal hidráulica), armada por fibra de carbono.

A Calda Reforçada com Fibras Unidireccionais (CRFU) é um compósito cimentício de elevado desempenho que foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa no âmbito da tese de doutoramento de Ana Rita Gião [Gião, 2012]. O objetivo do CRFU é melhorar o comportamento sísmico da zona comprimida de elementos de betão armado através de um encamisamento de reduzida espessura, de modo a adiar o esmagamento do betão e a encurvadura dos varões comprimidos, minimizando os danos no elemento estrutural. Este compósito foi caracterizado de forma a determinar as suas propriedades mecânicas, [Brás et al, 2013]; [Machado, 2013]; [Simão, 2016] e [Gião et al, 2017], tendo-se revelado como um material promissor a nível de confinamento e reforço de ligações viga-pilar e de zonas comprimidas de vigas [Gião, 2012] e [Gião et al, 2017].

O Textile Reinforced Mortar (TRM) consiste na impregnação de uma malha têxtil unidirecional ou em trama dispostas no mínimo em duas direções, normalmente ortogonais, por uma argamassa inorgânica, como por exemplo cal hidráulica ou argamassas cimentícias. A malha da fibra pode ser orientada segundo a direção mais conveniente, podendo esta ser ajustável através da quantidade, do espaçamento e da espessura das fibras, influenciando deste modo as características mecânicas do material, bem como a facilidade de impregnação da argamassa através da abertura da malha [Triantafillou, 2010]. Estes sistemas apresentam características interessantes a nível do reforço estrutural de elementos de betão armado, assim como aumentar a resistência à flexão e ao corte. O efeito de confinamento do betão resulta no aumento da resistência e da capacidade de deformação o que leva ao aumento de ductilidade e de dissipação de energia [Bruckner et al, 2006]. Podem também ser aplicados a estruturas de alvenaria como arcos e paredes, nomeadamente, estruturas de importância cultural visto estas possuírem requerimentos específicos de reforço e reabilitação. Este tipo de reforço requer o mínimo de intervenção possível sendo que o sistema aplicado tem de apresentar compatibilidade com a superfície original e durabilidade podendo ser substituído ou removido no futuro [De Santis & Gianmarco, 2014]. O comportamento do TRM com fibras de basalto foi estudado no âmbito da tese de doutoramento de Pello Larrinaga [Larrinaga, 2011] com apoio de investigadores da Universidade Nova de Lisboa, em especial no comportamento do TRM à tração [Larrinaga, 2011]; [Larrinaga et al, 2013; 2014].

## 1.2. Objetivos da Dissertação

A presente dissertação tem como objetivo o estudo do comportamento à tração de compósitos de matriz inorgânica. Para o efeito estudou-se o comportamento dos sistemas de reforço TRM e CRFU. No sistema TRM consideraram-se matrizes de origem cimentícia e de cal hidráulica natural e diferentes quantidades de armadura de reforço (uma ou duas camadas), constituídas por fibra de carbono. No caso do sistema CRFU, foi utilizada apenas a matriz cimentícia, para diferentes volumes de fibra de aço unidirecionais (1, 2 e 3%).

Para tal, apresentam-se sucintamente as etapas efetuadas na realização e estudo da campanha experimental:

- Caracterização mecânica do sistema TRM à tração uniaxial, aferindo a influência do número de camadas de fibra de carbono e a importância do tipo de matriz utilizada;
- Caracterização mecânica do sistema CRFU à tração uniaxial, aferindo a influência do volume de fibras de aço (unidirecionais) utilizado;
- Analisar o número, espaçamento e abertura de fendas observáveis em cada série de provetes, para ambos os sistemas de reforço e obter os campos de deslocamentos a partir do software *GOM Correlate*;
- Modelação dos modelos analíticos ACK, CM e CRFU
- Comparar os resultados obtidos experimentalmente do sistema TRM com os modelos analíticos AKC e CM e comparar os resultados experimentais do sistema CRFU com o modelo analítico CRFU.

### 1.3. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é constituída por 6 capítulos. O presente capítulo 1 (introdução) tem como principal finalidade introduzir e contextualizar o tema abordado ao longo do trabalho, referindo quais os objetivos e as etapas necessárias para a realização do mesmo.

No capítulo 2 (Estado de Arte) enquadra-se o contexto atual da Engenharia e Construção Civil em Portugal e no Mundo. Apresenta-se a descrição dos sistemas de reforço de FRP, TRM e CRFU, as suas matrizes e o tipo de fibras de reforço que os constituem. Mencionam-se também campanhas e estudos experimentais realizados por outros autores nesta temática.

O capítulo 3 (Campanha Experimental) apresenta e descreve as várias etapas realizadas ao longo da campanha experimental. Este capítulo especifica a caracterização das matrizes utilizadas e da fibra de carbono, bem como o processo de execução e cura dos provetes de TRM e CRFU. Também é feita uma descrição da instrumentação, do software *GOM Correlate* e do setup utilizado ao longo dos ensaios de tração uniaxial.

No capítulo 4 (Apresentação e Discussão dos Resultados), apresentam-se os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados. Neste capítulo analisa-se também o modo de rotura, o padrão e abertura de fendas obtidos experimentalmente e, através da análise dos campos de deslocamentos retirados a partir do *GOM Correlate*, compararam-se os resultados da campanha experimental com os resultados obtidos numericamente.

No capítulo 5 (Modelação), apresenta-se e comparam-se os resultados obtidos das séries de provetes de matriz cimentícia e de cal hidráulica natural do sistema de reforço TRM com as aproximações numérica de dois modelos analíticos distintos: o modelo ACK e o modelo CM. Comparam-se também os resultados obtidos das diversas séries de CRFU com o modelo analítico CRFU.

Por fim, no capítulo 6 (Conclusões e Desenvolvimentos Futuros), apresentam-se as conclusões retiradas ao longo da dissertação e realiza-se a interpretação final dos resultados, sendo referidos possíveis desenvolvimentos a realizar no futuro.

## 2. Estado de arte

### 2.1. Aspetos Gerais

A crise financeira de 2008 afetou drasticamente o setor da Construção Civil e, consequentemente, verificou-se uma diminuição na quantidade de novas construções. Este decréscimo teve como origem vários fatores, como as medidas de austeridade implementadas pelo Governo Nacional, a falta de financiamento de obras públicas, a quebra do poder de compra da população, o fato de existir um maior número de oferta do que de procura de casas habitacionais, entre outros. Apenas a partir de 2015 é que se tem verificado uma melhoria da economia nacional e consequentemente, uma melhoria na área da Construção Civil.

A diminuição de nova construção e a degradação de edifícios existentes promoveram a necessidade de repará-los ou reabilitá-los. Segundo os Censos Nacionais de 2001, cerca de 60% dos edifícios de habitação foram construídos antes de 1980, sendo que 40% da totalidade destes edifícios (aproximadamente 1,3 milhões) precisavam de algum tipo de reforço ou reabilitação.

Após os Censos Nacionais de 2011, por se ter tomado consciência desta necessidade de reforço e reabilitação, verificou-se uma diminuição, entre 2001 e 2011, de cerca de 36% no número de edifícios muito degradados e de 40,4% no número de edifícios com necessidade de grandes reparações, evidenciando uma grande redução do edificado em mau estado de conservação, tendo as regiões de Lisboa, Tâmega e Algarve registado o maior número de obras de reabilitação licenciadas neste período de tempo [INE,2011].

Mais recentemente, em 2016, de acordo com o Instituto Nacional de Estatística existiam em Portugal cerca de 3,6 milhões de edifícios de habitação familiar e 5,9 milhões de alojamentos familiares, tendo o número de edifícios licenciados em Portugal aumentado em 10,9% face a 2015 alterando assim a tendência de decréscimo verificada nos últimos anos, sendo que foram licenciados 16 738 edifícios. Também em 2016, as obras de reabilitação representaram 31,4% do total de obras realizadas em Portugal, tendo-se verificado, entre 2011 e 2016, um crescimento sucessivo do peso relativo deste tipo de obras, de 25,6% em 2011 para 31,4% em 2016, tendo 60,8% do total de obras de reabilitação sido destinadas à habitação familiar [INE, 2017].

Tal como foi referido, se ao longo do tempo as estruturas não forem preservadas, estas acabam por se degradar devido a vários fatores, como a deterioração do betão e do aço, a corrosão das armaduras, fenómenos naturais ou acidentais, bem como a alteração da finalidade da estrutura (o que leva à alteração das cargas aplicadas à mesma) [Lúcio, 2015/2016].

Com o aumento deste tipo de obras, surgiu um vasto número de sistemas de reforço e reabilitação, tais como o encamisamento de elementos estruturais com perfis metálicos, ferrocimento, Fiber Reinforced Polymers (FRP), Textile Reinforced Mortars (TRM), Calda Reforçada com Fibras Unidirecionais (CRFU), Fiber Reinforced Concretes (FRC), ou através da colagem de chapas de aço ou de FRP, entre outros. Os sistemas de TRM e CRFU são mais detalhadamente analisados e descritos ao longo da presente dissertação.

## **2.2. Fiber Reinforced Polymers (FRP)**

Durante vários anos, o material mais utilizado no reforço estrutural foi o betão armado, mas, ao longo das últimas décadas têm surgido novos materiais de construção, entre eles os materiais compósitos que têm apresentado uma importância crescente na área da Engenharia Civil. Desde 1980 que a comunidade da Engenharia Civil tem demonstrado grande interesse na aplicação de compósitos FRP, que têm sido sobretudo aplicados na área de reforço e reparação estrutural [Bournas & Triantafillou, 2008]. Esse interesse é comprovado pelo elevado número de estudos científicos e experimentais sobre os mesmos. [Chastre, 2005], [Chastre & Silva, 2010], [Biscaia, 2011], [Teng et al, 2012], [Ali et al, 2014] são alguns dos trabalhos desenvolvidos nesta área.

Os FRP são compósitos constituídos por fibras imersas numa resina polimérica, que desempenha a função de matriz do compósito, das quais as mais utilizadas são as resinas de éster vinílico, poliéster e epoxídicas. A matriz tem como função permitir a união das fibras mantendo-as na sua posição, protegendo-as de ações ambientais, permitindo a distribuição das cargas ao longo das mesmas. As fibras caracterizam a resistência mecânica do compósito, que depende do tipo de fibra utilizado, sendo que as mais comuns são as fibras de vidro e as de carbono. Estes compósitos são produzidos de várias formas como mantas, laminados, perfis ou varões.

Os compósitos de FRP apresentam como vantagens o facto de serem materiais leves e flexíveis, o que possibilita uma rápida e fácil execução dos mesmos, até em zonas de reduzida acessibilidade. Os compósitos de FRP também apresentam uma elevada resistência à tração, um elevado módulo de elasticidade, bem como uma grande durabilidade e resistência a impactos. Contudo a sua maior vantagem prende-se com as suas propriedades anisotrópicas, isto é, uma determinada propriedade física varia com a direção, logo as fibras podem ser orientadas numa multitude de direções de modo a otimizar as propriedades mecânicas do compósito.

Apesar das inúmeras vantagens mencionadas, os FRP também possuem desvantagens (sobretudo devido à utilização de resinas como matriz), tais como a perda de eficiência de reforço a temperaturas elevadas, uma reduzida resistência aos raios UV, o elevado preço das resinas, a incompatibilidade da resina com certas superfícies o que pode levar a um reforço estrutural deficiente, a necessidade de preparar a superfície de modo a garantir uma melhor aderência entre a estrutura e o compósito, o fato de serem materiais difíceis de reciclar e de requererem mão de obra especializada e

um controlo de qualidade elevado. Os FRP apresentam também uma falta de permeabilidade ao vapor de água, o que pode provocar danos no elemento estrutural, sendo que as resinas utilizadas como matriz produzem vapores perigosos para os trabalhadores.

Existem dois tipos de sistema de reforço exterior utilizando FRP, o sistema “pré-fabricado” e o sistema “wet lay-up”. O primeiro consiste em aplicar tiras de FRP pré-fabricadas com adesivos ao elemento estrutural, ou seja, é necessário que as fibras sejam impregnadas “in situ” sendo este sistema mais móvel em comparação com o sistema “wet lay-up”.

O sistema alternativo denominado “wet lay-up”, consiste na aplicação de uma camada de resina no estado líquido, seguida pela colocação do FRP em forma de manta e finalmente, pela aplicação de uma nova camada de resina, ou seja, as fibras são impregnadas aquando da aplicação em obra.

A escolha entre a utilização de um sistema ou outro depende do tipo de reforço necessário, sendo as tiras pré-fabricadas mais adequadas para superfícies planas, como lajes e paredes de alvenaria, enquanto que as mantas se aplicam melhor a elementos estruturais como vigas e pilares, visto estas serem flexíveis. [ACI, 2004], [Ehsani, 2005].



Figura 2.1 - Aplicação de laminados de FRP em a) lajes e em b) silos industriais [StructureMag, 2015]



Figura 2.2 - Aplicação de mantas de FRP em a) pilares e b) vigas [StructureMag, 2015]

### 2.3. Textile Reinforced Mortar (TRM)

O betão armado continua a ser o material mais utilizado na Construção moderna, mas com o passar do tempo e da sua vida útil, este poderá começar a apresentar diversas patologias que afetam as suas qualidades, sendo por isso necessário efetuar a manutenção e controlo do betão de modo a prolongar a vida útil das estruturas.

Os compósitos de FRP não conseguem distribuir os esforços uniformemente devido à concentração de tensões que se cria nas extremidades do compósito. No caso do reforço à flexão, o aparecimento de fendas no compósito cria concentrações de tensões que podem levar ao colapso do sistema. Em certas situações quando as estruturas são executadas com betão de baixa resistência mecânica, o reforço com FRP poderá não ser compatível devido à elevada rigidez do material, que restringe as deformações da estrutura, podendo originar um destacamento do reforço exterior (Figura 2.3 (b)). O uso de resinas poliméricas também apresenta um custo elevado pois o facto de a matriz ser orgânica pode originar uma incompatibilidade com certas superfícies, afetando a técnica de reforço [Larrinaga, 2011].

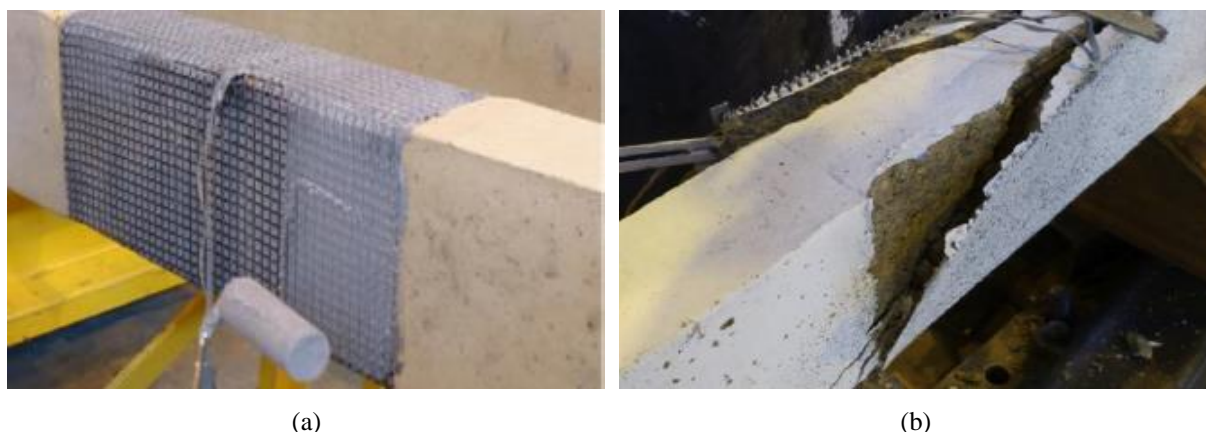


Figura 2.3 – a) Aplicação de resina epoxídica e b) Destacamento de FRP em vigas [Tetta et al, 2015]

A solução encontrada para mitigar estas desvantagens passou por substituir a matriz orgânica por uma matriz inorgânica, surgindo assim o Textile Reinforced Mortar (TRM). As matrizes inorgânicas podem ser de natureza cementícias, no caso de ser aplicada a um elemento estrutural de betão ou cal hidráulica para elementos de alvenaria, como paredes ou arcos.

Como a fluidez das argamassas utilizadas no TRM é menor, comparativamente com as resinas utilizadas nos FRP, foi necessário alterar o formato das fibras. Estas passaram a ter o formato de malha têxtil unidirecional ou em rede, dispostas no mínimo em duas direções, a malha é orientada consoante a direção mais conveniente e pode ser ajustável através da quantidade, do espaçamento e da largura das tiras de fibras utilizadas em cada direção, influenciando assim as características mecânicas do material e a facilidade de impregnação da argamassa (concebida à base de ligantes inorgânicos) através das



aberturas da malha. A argamassa deverá possuir uma elevada viscosidade, trabalhabilidade e baixa retração [Triantafillou, 2010].

No sistema de TRM as fibras são o elemento mais condicionante devido ao seu elevado custo. Por sua vez, as argamassas, que constituem a matriz, apresentam um baixo custo, quando comparadas às resinas poliméricas. Existem bastantes semelhanças entre o sistema de “wet lay-up” utilizado nos FRP e a técnica de reforço dos TRM, visto que numa primeira fase procede-se à preparação da superfície, colocando-se em seguida a primeira camada de argamassa, posicionando-se depois as fibras que, numa fase final, são impregnadas, na sua totalidade, pela última camada de argamassa (Figura 2.4) [Larrinaga, 2011].

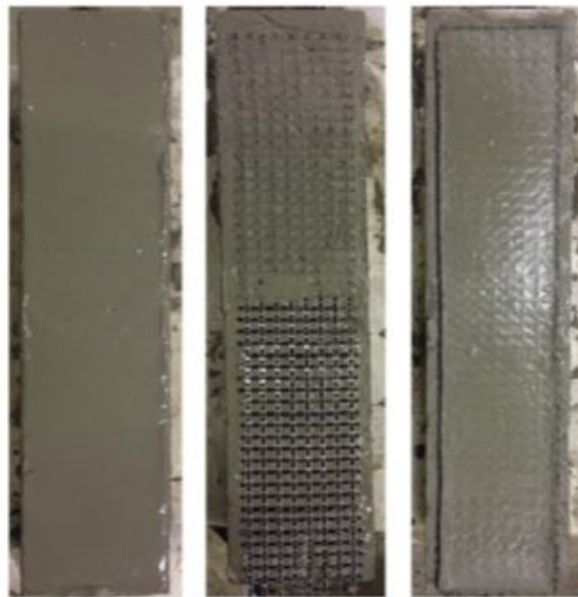


Figura 2.4 - Sistema de execução de TRM [Raoof et al 2017]

Ao longo dos anos, vários estudos experimentais têm sido realizados com o objetivo de caracterizar as propriedades dos TRM, seja pela utilização de diferentes formas de têxteis, a aplicação de matrizes alternativas ou a análise das condições de ligação entre as fibras e a matriz [Keil et al, 2008], [Hegger & Voss, 2008], [Bayer & Richter, 2010] e [De Santis & Gianmarco, 2014]. Para além destas campanhas experimentais, os TRM têm sido testados como sistemas de reforço à flexão, ao corte e ao confinamento de elementos de betão armado. A sua aplicação também tem sido analisada em estruturas de alvenaria, como arcos e paredes. Um dos objetivos de todas estas campanhas é provar a fiabilidade e viabilidade da utilização de TRM em obras de reforço e reabilitação. O reforço à flexão e ao corte de elementos de betão armado com TRM é bastante semelhante ao utilizado nos sistemas FRP.

A partir das campanhas experimentais realizadas por [Bruckner et al, 2006], [Larbi et al, 2010], [Larrinaga et al, 2010], [Raoof & Bournas, 2017] foi possível concluir que o encamisamento com TRM permite aumentar a resistência à flexão, diminuindo a abertura de fendas e as deformações, otimizando o comportamento dúctil dos elementos estruturais. Apesar de não serem tão eficientes como o encamisamento com FRP,

Larrinaga et al (2010) analisou o comportamento de vigas (com 1500 mm de comprimento, 150 mm de altura e largura) sujeitas à flexão, duas das vigas reforçadas com duas camadas de fibra de basalto e outras duas reforçadas por uma camada de fibra de carbono. O padrão de fendas em todas as vigas reforçadas foi alterado, tendo-se verificado uma diminuição do espaçamento e abertura de fendas. Este é um efeito desejável, uma vez que melhora a distribuição dos esforços ao longo do sistema de reforço e aumenta a durabilidade da viga, visto que a abertura de fendas é menor.

A partir dos resultados obtidos, o autor concluiu que as vigas reforçadas com fibra de basalto e de carbono permitiram um aumento do momento máximo a meio vão de 40.5% e 48.5%, respetivamente, tendo a fibra de basalto (com 0.0424 mm de espessura nominal e um módulo de elasticidade de 55 GPa) apresentado uma maior capacidade de deformação comparativamente à fibra de carbono (com 0.056 mm de espessura nominal e um módulo de elasticidade de 240 GPa).

Raoof & Bournas (2017) analisaram o comportamento de vigas sujeitas à flexão (com 1677 mm de comprimento, 203 mm de altura e 102 mm de largura), reforçadas com sistemas de FRP e TRM, com uma e três camadas de fibra de carbono, a uma temperatura de 20 °C e de 150 °C.

Após a realização dos ensaios, os autores concluíram que, em comparação com as vigas de controlo (sem reforço), o sistema de FRP permite um aumento de resistência última de 43.9% e 60.4% (para uma e três camadas respetivamente) a uma temperatura de 20 °C, mas para uma temperatura de 150 °C, esse aumento é apenas de 3.8% e 5.8%. Por sua vez, o sistema de reforço TRM para uma e três camadas de reforço permite um aumento de 12.7% e 59.8%, a 20 °C, enquanto que a 150 °C se verificou um aumento de 9.1% e 29.2%.

Com base nestes resultados, aferiu-se que a 20°C, o sistema de FRP é mais eficaz que o sistema de TRM mas, a 150 °C, observa-se o inverso, pois a resina dos FRP a elevadas temperaturas perde as suas propriedades mecânicas e deteriora-se mais rapidamente que as argamassas utilizadas nos TRM. Foi também possível concluir que a variação do número de camadas de reforço tem um maior impacto no aumento de resistência no sistema TRM do que no sistema de FRP, pois devido a este aumento foi possível alterar o modo de rotura do sistema de TRM. Para uma camada de fibra de carbono a rotura ocorreu devido ao deslizamento das fibras de reforço, enquanto que, para três a rotura ocorreu devido ao destacamento do sistema. Por sua vez, o aumento do número de camadas de reforço não alterou o modo de rotura do sistema de FRP, caracterizado pela falha de adesão na zona de interface betão-resina.

Triantafillou & Papanicolaou (2005), Bruckner et al (2006), Tetta et al (2015), Escrig et al (2015) e Tetta & Bournas (2016) apresentaram trabalhos experimentais sobre o reforço ao corte de elementos estruturais com o uso de TRM. A partir destas campanhas, conclui-se que a utilização de TRM origina um aumento da resistência e de dissipação de energia, melhorando assim o comportamento dúctil do elemento. Mas, à semelhança do reforço à flexão, o sistema de FRP revela-se mais eficaz neste tipo de reforço se não se encontrar sujeito a elevadas temperaturas.

Tetta et al (2015) analisou o comportamento de vigas sujeitas ao corte (com 1675 mm de comprimento, 200 mm de altura e 100 mm de largura), reforçadas com sistemas de FRP e TRM, ambos os sistemas com uma e duas camadas de fibra de carbono. O autor aferiu que o encamisamento com FRP é mais eficaz no aumento de resistência ao corte do que o encamisamento com TRM. No entanto, o sistema de TRM permite um maior aumento de capacidade de dissipação de energia, aumentando assim a ductilidade das vigas.

Em relação ao reforço com uma camada de fibra de carbono o fator de eficácia do TRM é de 0.09 comparativamente ao sistema de FRP, enquanto que para duas camadas esse fator é de 0.92. Esta discrepância é justificada pela alteração do modo de rotura, pois para uma camada de carbono, deu-se a rotura devido ao deslizamento das fibras ao longo da matriz enquanto que, para duas camadas, a rotura ocorreu devido ao destacamento do sistema de TRM.

Escrig et al (2015) analisou o comportamento de vigas sujeitas ao corte, encamisadas em U por uma camada de fibra de basalto, vidro ou carbono, e impregnadas com argamassa cimentícia. As vigas foram executadas com 1700 mm de comprimento e 300 mm de altura e comprimento.

Após a realização dos ensaios os autores aferiram que, em média, a aplicação de fibras de basalto e vidro permitiram um aumento da de 36% de capacidade resistente ao corte, enquanto as fibras de carbono apresentaram apenas um aumento de 22%. Em termos de deslocamentos, observou-se um aumento médio de 120% para as fibras de basalto e de vidro, e de 70% para o carbono, aumentando assim a deformabilidade das vigas reforçadas relativamente às vigas de controlo. Logo, concluiu-se que devido à aplicação das fibras todas as vigas reforçadas apresentaram um aumento de capacidade de dissipação de energia e de ductilidade, comparativamente à viga de controlo (sem reforço) que apresentou um modo de rotura frágil. O autor concluiu também que, apesar das fibras de basalto e vidro apresentarem resultados semelhantes, as fibras de vidro apresentam uma melhor performance em termos de ligação fibra-matriz.



Figura 2.5 - Processo de aplicação de TRM em vigas [Escrig et al 2015]



Figura 2.6 - Instrumentação utilizada no ensaio ao corte em vigas [Escrig et al 2015]

A análise ao reforço por confinamento foi efetuada por Bournas & Triantafillou (2008), Bournas (2008) e Garcia et al (2010). A partir destas campanhas experimentais, determinou-se que o encamisamento com TRM é menos eficaz que o encamisamento com FRP, relativamente ao aumento de resistência mecânica. Contudo, em termos de ductilidade e dissipação de energia, o TRM apresenta melhores resultados.

Garcia et al (2010) submeteu à compressão uniaxial provetes cilíndricos de 300 mm de altura e 150 mm de diâmetro reforçados com uma e duas camadas de fibra de basalto (Figura 2.7), impregnadas por duas matrizes distintas (argamassa cimentícia e argamassa pozolânica).

Os ensaios foram realizados após 70 dias de cura, tendo os autores aferido um aumento médio de resistência de 21% para uma camada de fibras de basalto impregnadas pela argamassa pozolânica, ao passo que, para as fibras impregnadas com argamassa cimentícia, verificou-se um aumento médio de resistência de 32%. Foi também possível concluir que, com a aplicação da segunda camada de fibras não se observou um aumento considerável comparativamente aos provetes reforçados com uma camada



de fibra, sendo a diferença de aumento de resistência de apenas 2%. Apesar disso, verificou-se um aumento da capacidade de dissipação de energia e, conseqüentemente, um aumento de ductilidade dos provetes.



Figura 2.7 - Processo de confinamento com TRM de betão em provetes cilíndricos [Garcia et al, 2010]



Figura 2.8 - Confinamento de pilares com TRM [Bournas & Triantafillou, 2008]

Os TRM podem também ser aplicados no reforço e reabilitação de arcos e paredes de alvenaria. Garmendia (2010) levou a cabo uma campanha experimental sobre arcos (Figura 2.9 (b)), tendo executado no total 12 arcos (com 1.13m de vão, 0.44m de altura, 0.25m de largura e 0.12m de espessura), 3 de controlo, 3 reforçados com fibras de basalto colocadas em ambas as faces, 3 com fibras na face interior e 3 na face exterior. Após a realização dos ensaios, a autora constatou que o uso de TRM previne a rotura frágil apresentada pelos arcos de controlo, tendo a resistência de tensão última aumentado 21, 13 e 9 vezes (respetivamente para os arcos reforçados em ambas as faces, na face exterior e na face interior respetivamente, quando comparados com os arcos de controlo).

Em relação ao reforço de paredes de alvenaria Faella (2009) e Triantafillou (2010) concluíram que o uso de TRM aumenta a resistência mecânica e a ductilidade, demonstrando assim que este sistema é uma boa opção de reforço sísmico.

Faella (2009) executou paredes de alvenaria em tufo (Figura 2.9 (a)) com 1160 mm de comprimento, 1160 mm de altura e 380 mm de largura, reforçadas com uma camada de fibra de carbono

e impregnada por uma argamassa cimentícia. As paredes foram sujeitas a um ensaio de compressão diagonal e, enquanto as paredes de controlo suportaram uma carga de rotura entre os 30 e 45 kN, as paredes reforçadas suportaram valores de carga até 4 a 6 vezes superiores.



Analisando os resultados obtidos nos estudos mencionados anteriormente, pode-se aferir que os TRM são uma boa alternativa aos FRP, motivo pelo qual a comunidade de Engenharia Civil se continua a focar-se no desenvolvimento dos TRM, de forma a maximizar as suas vantagens e potencialidades, minimizando as suas desvantagens, tais como a ocorrência de imperfeições na ligação fibra-matriz e matriz-superfície.

### 2.3.1. Fibras

Nos TRM, as fibras são o cerne do sistema. Estas, geralmente, são rígidas e possuem uma relação comprimento/diâmetro elevada. A característica principal é possuírem uma elevada rigidez e resistência (relativamente ao seu peso), comparativamente a outros materiais convencionais como o aço ou ferro.

Para produzir uma malha de fibras, são necessários centenas de filamentos (torcidos e unidos entre si) de modo a formar um fio. Consequentemente, a quantidade e o diâmetro dos filamentos condicionam a espessura do fio. Ao se dispor um determinado número de fios, geralmente em duas direções ortogonais, obtém-se uma malha de fibras.

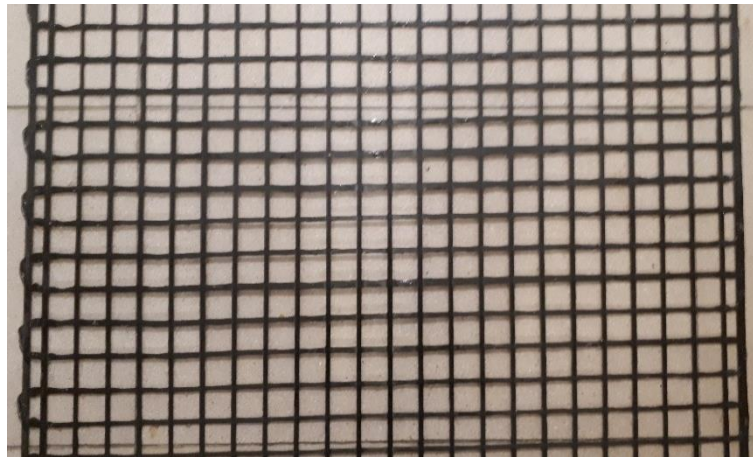


Figura 2.10 - Malha de fibras de carbono bidirecional

Um fator importante nos TRM é a interação das fibras com a matriz. Vários estudos demonstraram que apenas os filamentos exteriores dos fios estão em contato direto com a matriz, logo a transmissão de esforços é realizada por atrito dos filamentos exteriores para os interiores. Portanto a transferência de tensões ao longo do fio é condicionada pelo atrito existente entre os diversos filamentos [Häußler-Combe & Hartig, 2007], [Dolotabadi et al, 2010]

O uso de polímeros pode minorar este problema aumentando a eficiência do sistema. A adição de epóxidos à matriz altera as propriedades da ligação, aumentando assim o número de filamentos impregnados [Keil et al, 2008]. A ligação entre as fibras e a matriz pode também ser melhorada alterando a superfície das fibras de modo a criar uma superfície mais rugosa, aumentando a rugosidade macroscópica da fibra e as forças de atrito entre os elementos de modo a criar uma melhor aderência [Dilthey et al, 2006]

Durante o processo de produção, os filamentos são tracionados de modo a possuírem uma taxa de deformação semelhante entre si, sendo que na fase final as fibras são normalmente revestidas com uma resina de modo a melhorar a sua durabilidade e a otimizar a aderência entre a fibra e a matriz [Dilthey et al, 2006].

As fibras de reforço (como a fibra de carbono, basalto e vidro, entre outras) apresentam um comportamento elástico linear (Figura 2.11) e um módulo de elasticidade muito superior ao da matriz, assim no caso de surgirem fendas, a rigidez do sistema não é afetada significativamente [Larrinaga, 2011], sendo estas características semelhantes no sistema de CRFU.

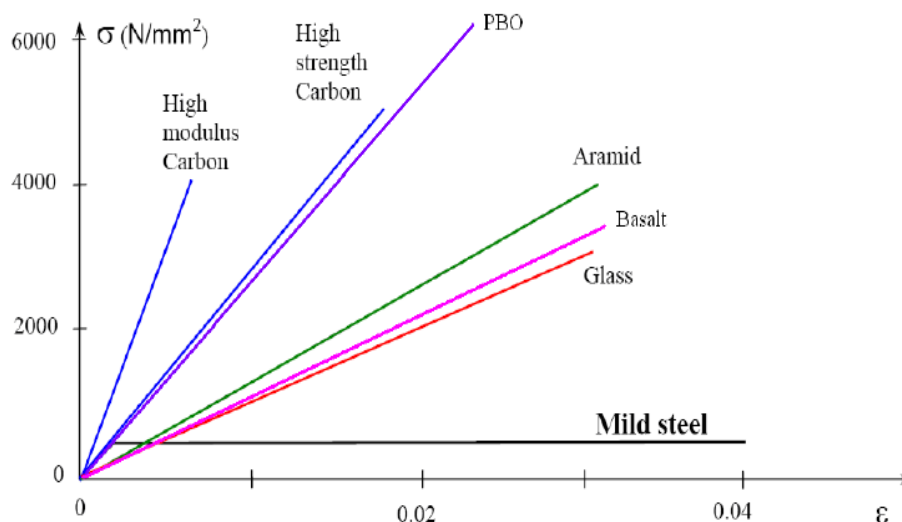


Figura 2.11 - Gráfico tensão-extensão de diversas fibras de reforço  
[Larrinaga, 2011]

Na presente dissertação, procedeu-se ao estudo de um sistema TRM cuja armadura é constituída por fibras de carbono (Figura 2.10). Este tipo de fibras é caracterizado por possuir um diâmetro reduzido (0.005 a 0.01mm). Trata-se de um material com uma densidade reduzida, o que o torna bastante leve. Caracteriza-se também por possuir uma elevada resistência à tração uniaxial, baixa fluência, expansão e condutividade térmica, e apresentar boa condutividade elétrica. Por estas razões, é bastante utilizada na área automóvel, aeroespacial, militar e na Engenharia Civil.

Apesar destas propriedades, a fibra de carbono apresenta algumas desvantagens tais como: uma baixa resistência à compressão, aos raios UV e a elevadas temperaturas, um custo elevado (comparativamente à fibra de vidro), sendo que a sua aderência a matrizes inorgânicas não é tão eficaz comparativamente à fibra de vidro, logo é necessário um maior número de camadas de revestimento para melhorar as propriedades dos filamentos [Larrinaga, 2011].

### 2.3.2. Matriz

Nos TRM, as argamassas representam a matriz (inorgânica) do sistema, logo estas têm de possuir determinadas características mecânicas e de durabilidade. De modo a otimizar as ligações fibra-matriz e compósito-superfície, Garcia (2009) e Triantafillou (2010) definiram as propriedades mais importantes das matrizes.

A matriz deverá apresentar uma taxa reduzida de perda de trabalhabilidade, baixa retração e fluência, possuir elevada viscosidade e trabalhabilidade, ser permeável ao vapor de água, possuir uma resistência inicial elevada (pois as matrizes inorgânicas necessitam de um maior tempo de cura em comparação com as matrizes orgânicas) e serem flexíveis de modo a permitirem pequenas deformações. O processo de seleção da matriz a ser aplicada necessita de ter em conta as propriedades e a geometria do têxtil de modo a estes serem química e fisicamente compatíveis.



### 2.3.3. TRM sujeito a tração uniaxial

As matrizes inorgânicas utilizadas nos sistemas de TRM apresentam uma elevada resistência à compressão, mas possuem baixa resistência à tração e um comportamento frágil na rotura. Logo, devem ser reforçadas de modo a mitigar as suas desvantagens. A utilização de fibras de reforço condiciona a resistência à tração e a capacidade de dissipação de energia da matriz, aumentando assim a sua ductilidade. Em elementos com maior espessura (entre 100 a 200 mm) as fibras têm como principal função controlar a fendilhação, ao passo que, para elementos mais finos (até 10 mm), as fibras atuam como armadura de reforço do elemento [Larrinaga, 2011]. Quando um sistema de TRM é sujeito à tração uniaxial, as matrizes inorgânicas atingem a tensão de rotura antes de se atingir a extensão última da fibra. Logo, são as fibras de reforço que suportam a carga aplicada após a matriz fendilhar, isto se as fibras representarem uma área de armadura superior à armadura mínima, caso contrário verifica-se uma única fenda. Na Figura 2.12, pode-se observar o gráfico tensão-extensão tipo de um sistema TRM sujeito à tração, onde se consegue distinguir 3 fases distintas ao longo da curva não linear.

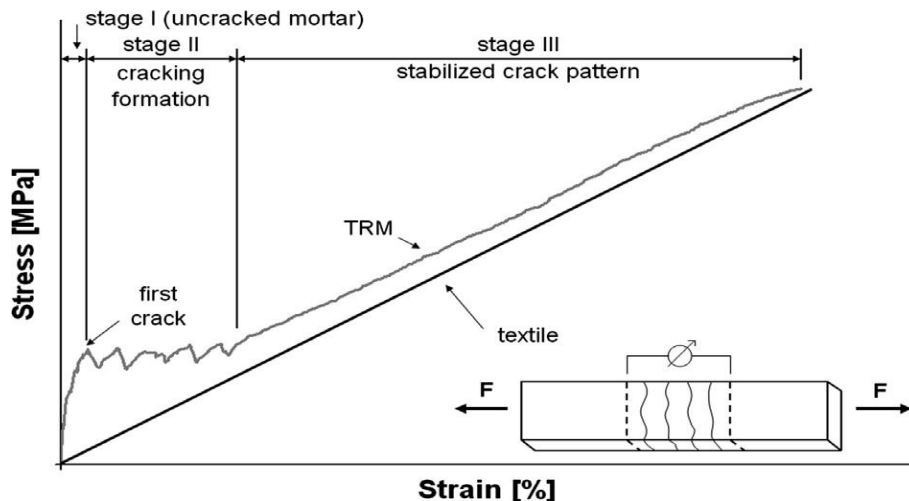


Figura 2.12 - Gráfico tensão-extensão tipo de um sistema TRM sujeito à tração [Larrinaga et al, 2013]

A primeira fase, denominada por fase de pré fendilhação, termina com o surgimento da primeira fenda, sendo a rigidez do compósito (antes de fendilhar) semelhante ao módulo de elasticidade da matriz. A segunda fase, denominada por fase de fendilhação, inicia-se quando surge a primeira fenda no compósito, sendo a carga aplicada suportada pelas fibras de reforço. Com o aumento de carga, surgem novas fendas ao longo do elemento, sendo a sua abertura e o seu espaçamento condicionado pela ligação fibra-matriz e pela tensão última da matriz. Esta fase termina quando já não é possível surgirem novas fendas no compósito. A terceira fase, denominada por fase pós-fendilhação, inicia-se após a formação de todas as fendas (criando assim um padrão de fendas estabilizado). O compósito apresenta nesta fase um comportamento linear, mas com uma menor rigidez comparativamente à primeira fase, pois só as fibras suportam a carga aplicada (até estas atingirem a rotura) [Cuypers & Wastiels, 2006], [Hegger et al, 2006].

A partir da Figura 2.13, pode afirmar-se que as fendas originam uma variação na distribuição das tensões de corte ao longo da ligação fibra-matriz e nas tensões axiais ao longo da fibra e da matriz. Além das secções fendilhadas (onde a carga axial é suportada pelas fibras) a formação de fendas leva à degradação parcial da ligação fibra-matriz na zona próxima do limite da fenda, surgindo um deslizamento entre a fibra e a matriz. Porém, a uma determinada distância da fenda, essa ligação é totalmente recuperada [Tekiele et al, 2016].

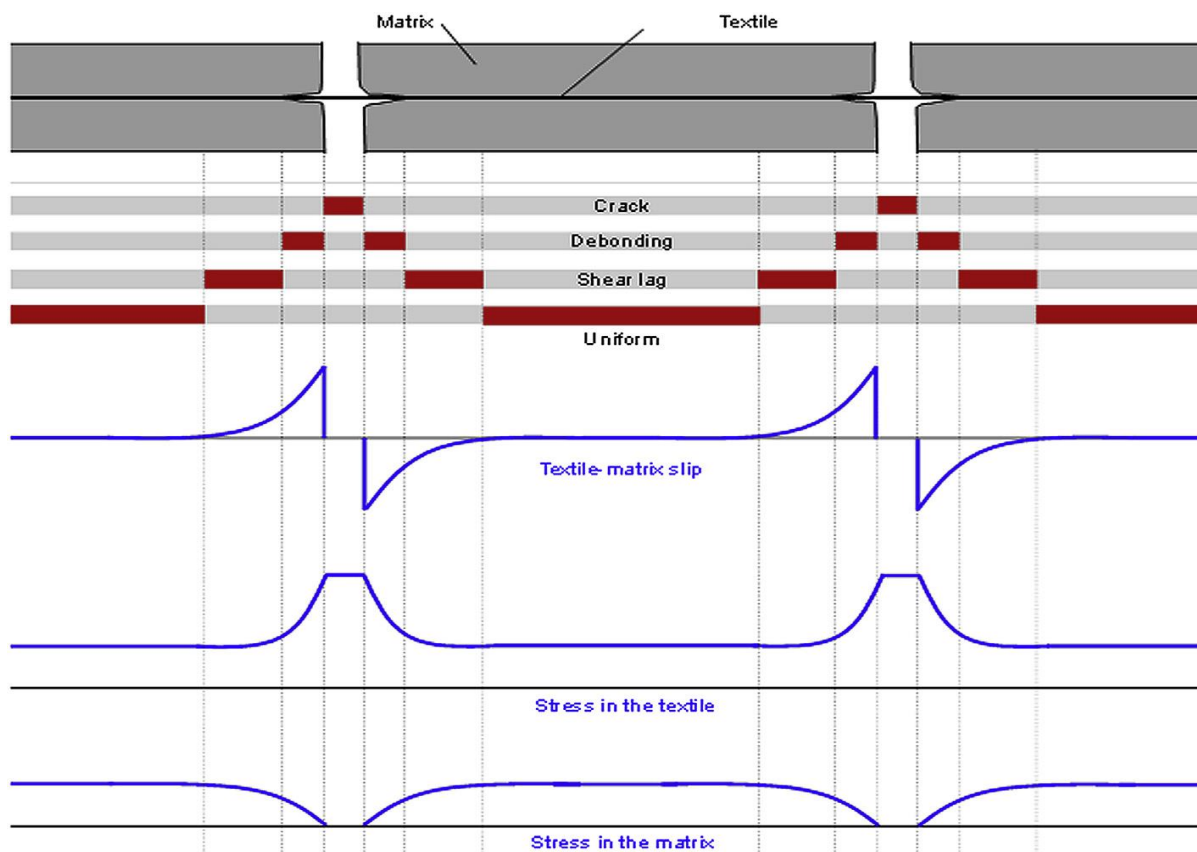


Figura 2.13 - Mecanismo esquemático da transferência de tensões entre a ligação fibra-matriz, das zonas de deslizamento, das tensões suportadas pela fibra e pela matriz [Tekieli et al, 2016]

## 2.4. Calda Reforçada com Fibras Unidirecionais (CRFU)

A CRFU trata-se de um material compósito cimentício de “elevado” desempenho. Este material foi desenvolvido por Gião, na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, no âmbito da sua tese de doutoramento [Gião, 2012].

O principal objetivo deste compósito é reforçar através do encamisamento de pequena espessura, elementos estruturais de betão armado de forma a minimizar os danos provocados pela encurvadura das armaduras (na zona comprimida) e mitigar o esmagamento do betão. O compósito é constituído por uma calda cimentícia (matriz do compósito) reforçada com fibras de aço unidirecionais e contínuas (cuja esbelteza tende para infinito) dispostas sob a forma de manta não tecida.

De modo a caracterizar a matriz do compósito, Brás et al (2013) levou a cabo uma campanha experimental, tendo estabelecido que a calda cimentícia deveria possuir uma elevada resistência à tração e compressão, ser autocompactável, ter boa trabalhabilidade, baixa retração, boa durabilidade e ser facilmente injetada nas cofragens que contém as fibras. Ao longo desta campanha foram realizados estudos de caracterização mecânica, reológicos e de retração. Conclui-se que, de modo a poderem ser obtidas as melhores propriedades da calda, esta deveria ser executada com os seguintes constituintes e proporções: cimento Portland CEM I 45,2R + 2%SF (sílica fumo) + 0,5%SP (superplastificante) e uma relação água/ligante de 0.3 ( $a/l=0.3$ ). A calda apresentou bons resultados de resistência à compressão, tração e retração, apresentando um comportamento autocompactável e boa trabalhabilidade. Contudo, acima dos 35 °C, observou-se uma elevada perda de trabalhabilidade.

As fibras utilizadas na CRFU são fornecidas pela empresa *FAVIR*. Estas são produzidas a partir de um processo de laminação de um fio de aço com um diâmetro de 3.1mm, originando assim uma manta constituída por filamentos contínuos de aço (Figura 2.12).



Figura 2.14 - Processo de produção das mantas de fibras contínuas e unidirecionais de aço  
[Gião et al, 2017]

A utilização de fibras contínuas sob a forma de manta permite otimizar a resistência e a orientação das fibras no compósito de modo a atingir resistências “elevadas” à tração. Como a sua esbelteza tende para infinito, a rotura do material está associada à rotura das fibras. A tensão de rotura das fibras é preponderante na resistência à tração do compósito [Gião, 2012]. De maneira a caracterizar os fios de aço a partir do qual a manta de fibras é produzida, Gião (2012) realizou ensaios de tração em três fios de aço tendo obtido o seguinte gráfico tensão-deformação e resultados que se apresentam na Figura 2.15 e na Tabela 2.1.

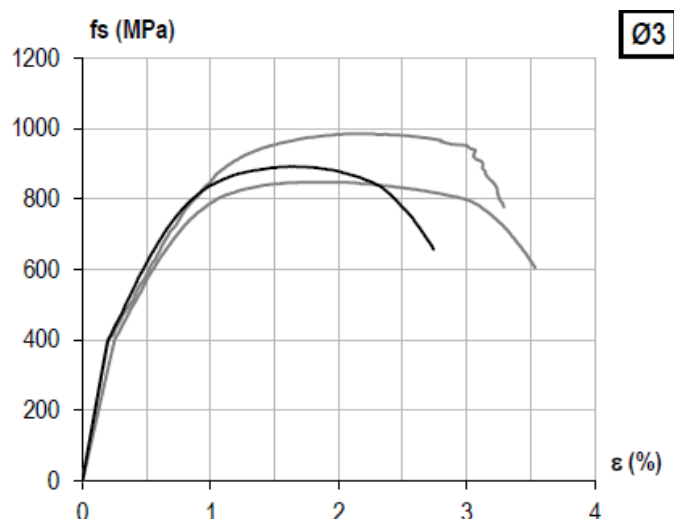


Figura 2.15 – Diagrama tensão- deformação dos ensaios à tração dos fios de aço [Gião, 2012]

Tabela 2.1- Características mecânicas obtidas dos ensaios à tração dos fios de aço [Gião, 2012]

Ø (mm)	Amostras	A (mm <sup>2</sup> )	$f_{su}$ (Mpa)	$f_{sum}$ (Mpa)	$\epsilon_{su}$ (%)	$\epsilon_{sum}$ (%)	$\epsilon_{sr}$ (%)	$\epsilon_{srm}$ (%)
3,1	1	7,55	892,68		1,6		2,7	
	2		847,41	908,2	1,7	1,8	3,5	3,2
	3		984,64		2,0		3,3	

Onde  $f_{su}$  - tensão de rotura no aço;

$f_{sum}$  - valor médio da tensão de rotura no aço;

$\epsilon_{su}$  - extensão de rotura do aço;

$\epsilon_{sum}$  - valor médio da extensão de rotura do aço;

$\epsilon_{sr}$  - valor de extensão máxima do aço;

$\epsilon_{srm}$  - valor médio da extensão máxima do aço.

De forma a determinar a percentagem máxima de fibras a incorporar no compósito e avaliar a penetrabilidade da matriz, a presença de vazios e as propriedades mecânicas da calda, foram executados provetes de dimensão 160x40x40 mm impregnados por caldas com uma relação de água/cimento (a/c) de 0.28 e 0.4, ambas com 3% de superplastificante, fazendo variar a percentagem de fibras entre os 1% e 5%.

Com base nos ensaios realizados, aferiu-se que a percentagem máxima de fibras a usar não deveria ultrapassar os 3% pois, para valores superiores os provetes apresentavam anomalias na sua betonagem devido à dificuldade de impregnação da calda, originando um aumento da porosidade e consequentemente um aumento do volume de vazios.



Figura 2.16 - Anomalia em provete com 4% de volume de fibras e relação  $(a/c) = 0.28$

[Brás et al, 2013]

De modo a dar seguimento aos ensaios de caracterização deste compósito, Machado (2013) realizou uma campanha de testes com provetes tubulares de 300 mm de altura, 150 mm de diâmetro exterior e 110 mm de diâmetro interno. O autor concluiu que a calda cimentícia apresenta uma resistência média à compressão de 94.6 MPa e um módulo de elasticidade médio de 24.5 GPa, tendo os valores obtidos para a CRFU sido inferiores. Este decréscimo deve-se ao aumento do número de vazios. Em relação à resistência à tração, foram executados provetes cúbicos de 150x150x150 mm para volumes de fibras de 0% (sem fibras), 2% e 3% que foram posteriormente ensaiados à tração por compressão diametral, tendo o autor obtido, respetivamente, uma resistência média de 2.27 MPa, 11.15 MPa e 13.5 MPa. Assim aferiu-se que o volume de vazios não influencia de forma significativa esta propriedade.



Figura 2.17 - Preparação e impregnação com calda dos provetes cúbicos [Machado, 2013]

Gião et al (2017) realizou também um estudo sobre a caracterização mecânica da calda cimentícia, que consistiu num conjunto de testes, nos quais se procedeu à execução e ensaio de provetes tubulares com 300mm de altura, 150mm de diâmetro exterior e 110mm de diâmetro interno. Obteve-se um valor médio de resistência à compressão de 96 MPa e um valor médio do módulo de elasticidade de 25 GPa. Tal como Machado (2013), os valores para a CRFU foram menores, relativamente à resistência de compressão, houve um decréscimo de 31.6% e de 7.7% em relação ao módulo de elasticidade, para uma percentagem de fibras de 3%.



Figura 2.18 - Execução dos provetes tubulares [Gião et al, 2017]

De modo a determinar a resistência média à tração, foram executados provetes cúbicos de 150x150x150 mm (Figura 2.18) que foram posteriormente ensaiados à tração por compressão diametral, para os quais se obteve uma resistência de 1.42 MPa, tendo os valores obtidos no CRFU sido maiores. Para uma percentagem de 3% de fibras houve um aumento de resistência à tração de 88.4%.

Com base nos valores obtidos, os autores concluíram que a aplicação de fibras aumenta a resistência à tração do compósito, existindo uma proporcionalidade entre a resistência à tração e o volume de fibras utilizado. O modo de rotura do compósito à tração é condicionado pela resistência das fibras, mas não pelo número de vazios, ao passo que a resistência à compressão do compósito é condicionada pela resistência da calda cimentícia, sendo esta afetada pelo número de vazios.

Outros estudos experimentais, desenvolvidos por Gião (2012) e Simão (2016), pretenderam aferir as potencialidades da CRFU como sistema de reforço por encamisamento de elementos estruturais.

De forma a avaliar a eficiência da CRFU, Gião (2012) desenvolveu uma campanha experimental de ensaios à flexão de vigas com cintagem insuficiente (Figura 2.19 a 2.21), cujo principal objetivo era avaliar a capacidade resistente e ductilidade destes elementos. Para tal, executaram-se vigas com 2.0 m de comprimento, tendo uma sido reforçada por encamisamento com CRFU e outra na qual o recobrimento foi substituído por encamisamento de CFRU na zona comprimida.

Após a realização dos ensaios, foi possível observar que a rotura das vigas ocorreu no tramo central devido à compressão do betão, tendo ocorrido o destacamento do recobrimento, agravado pela encurvadura dos varões longitudinais. A partir dos ensaios foi possível concluir que, em todos os modelos reforçados com CRFU, houve um aumento da capacidade resistência e de dissipação de energia, melhorando assim o comportamento dúctil das vigas.





Figura 2.19 - Rotura das vigas de referência [Gião, 2012]



Figura 2.20 - Rotura da viga reforçada por substituição do recobrimento com CRFU [Gião, 2012]



Figura 2.21 - Rotura da viga reforçada por encamisamento com CRFU [Gião, 2012]

De modo a avaliar a eficiência do reforço por encamisamento com CRFU na ligação viga-pilar Gião (2012) elaborou uma campanha experimental que pretendia aplicar uma ação sísmica a um pórtico. Para tal realizaram-se ensaios quasi-estáticos recorrendo a ensaios cíclicos de modo a reproduzir a resposta da zona crítica das vigas, simulando assim as ações verticais em simultâneo com as horizontais (figura 2.23). Deste modo as vigas ensaiadas foram encamisadas com CRFU com um volume de 3% de fibras (ao longo da alma da viga) com 0.02 m de espessura e uma extensão de 0.60 m na zona comprimida.

Desenvolveu-se um modelo (apenas) pré-esforçado exteriormente denominada por VPE. Posteriormente executou-se uma solução de reforço da zona comprimida da viga por encamisamento com CRFU complementada ao reforço de pré-esforço (VPEE). O modelo pretende simular um pórtico com 4.5 metros de vão mas o modelo simplificado corresponde a uma viga em consola com 1.5 metros de vão (Figura 2.22), tendo o recobrimento sido de 0.02m em ambos os modelos.

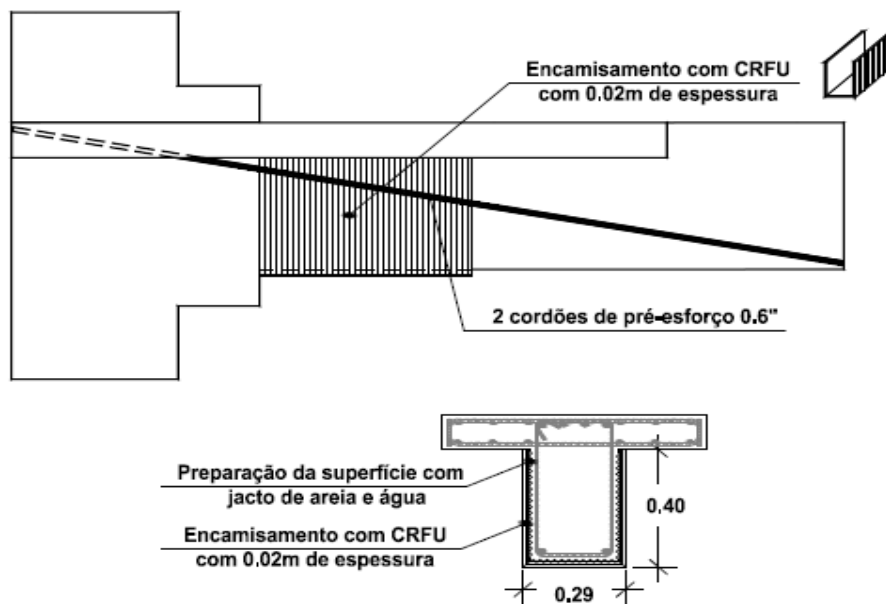


Figura 2.22 – Geometria do reforço por encamisamento com CRFU e pré-esforço (VPEE) [Gião, 2012]

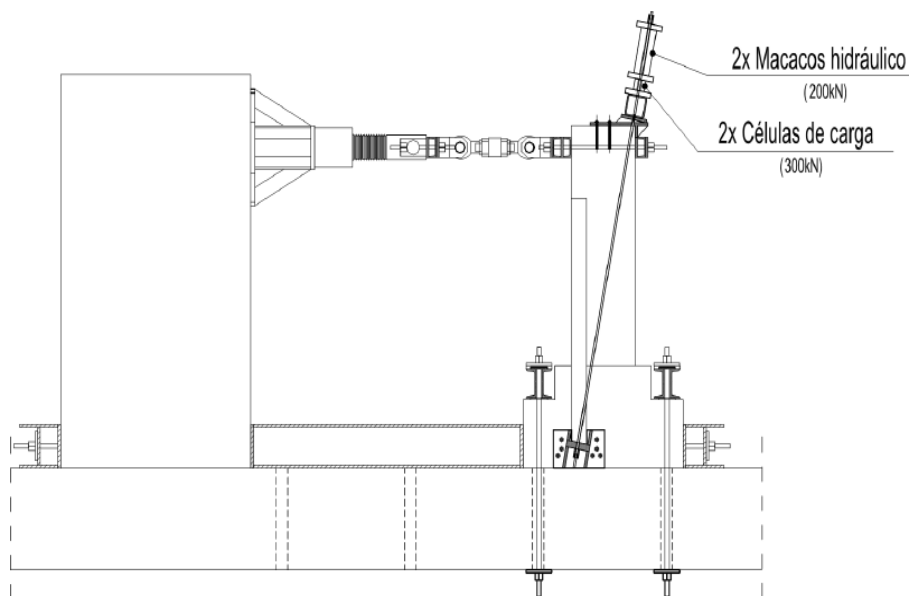


Figura 2.23 – Esquema de ensaio e de aplicação do pré-esforço [Gião, 2012]

O modelo VPEE, pré-esforçado e encamisado com CRFU na zona comprimida apresentou menores deformações e uma resistência superior em comparação ao modelo VPE (apenas pré-esforçado). Foi também possível aferir que o encamisamento com CRFU permitiu mitigar o esmagamento do betão, prevenindo a encurvadura dos varões da armadura inferior diminuindo assim os danos após a rotura da viga comparativamente ao modelo VPE (Figura 2.24), tendo-se verificado um aumento de resistência à flexão de 13% e de 31% de energia dissipada enquanto a deformação residual foi reduzida em 53%.



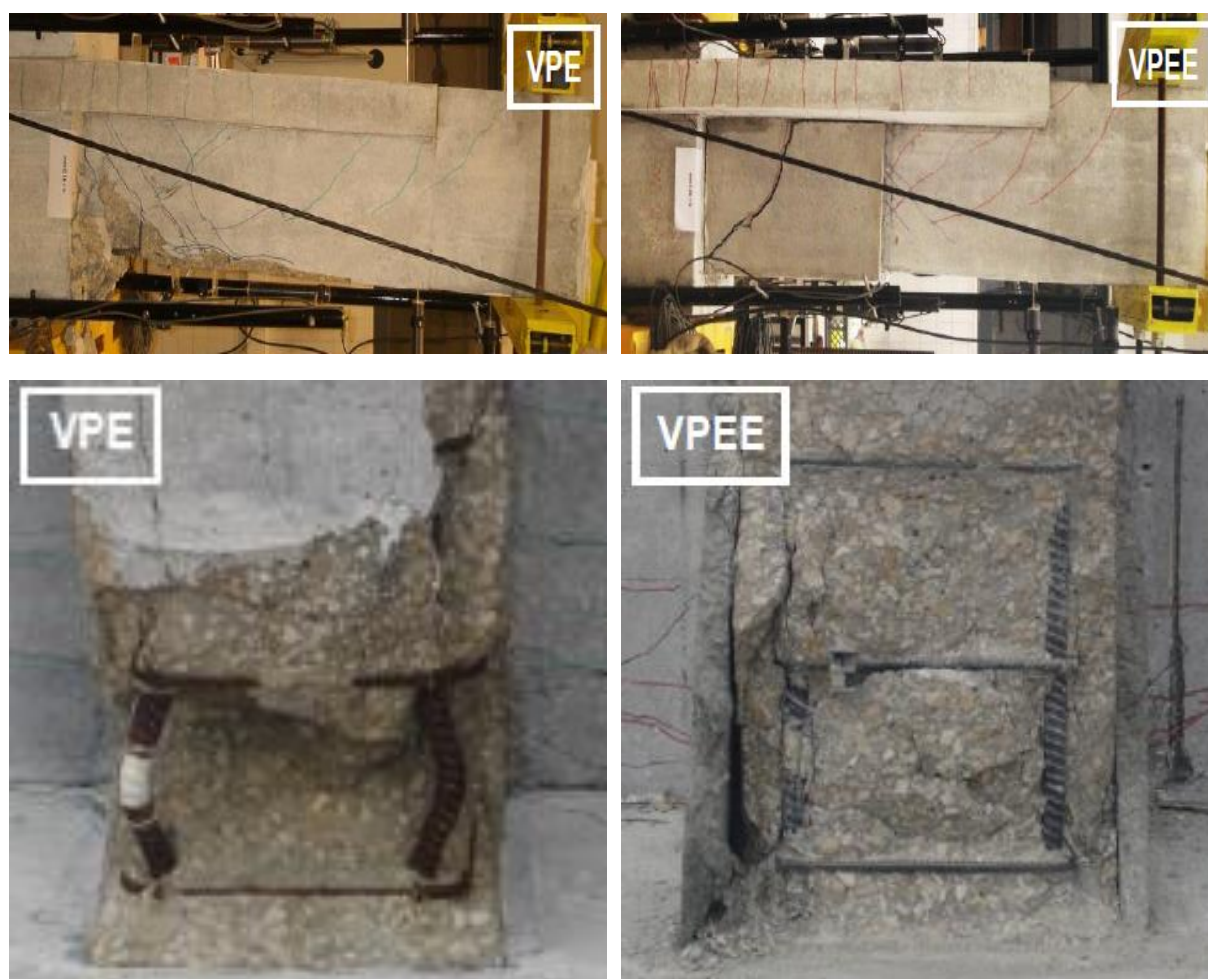


Figura 2.24 – Modo de rotura dos modelos, alçado lateral e alçado frontal da zona crítica [Gião, 2012]

De forma a dar continuidade aos estudos realizados, Simão (2016) realizou uma campanha experimental onde foram produzidos provetes cilíndricos com 300 mm de altura e 150 mm de diâmetro, com espessuras de encamisamento (com calda de cimento) de 20 mm e 30 mm, e diferentes volumes de fibras (0%, 1%, 2% e 3%). A partir dos ensaios de compressão axial simples, concluiu-se que os provetes com 20 mm e 30 mm de encamisamento, sem fibras, apresentaram uma tensão de rotura de 46.8 MPa e 45.1 MPa. Os provetes confinados por CRFU, com encamisamento de 20 mm, com uma percentagem em volume de fibras de 1%, 2% e 3% obtiveram uma tensão de rutura de 53.2 MPa, 62 MPa e 68.4 MPa, os provetes com encamisamento de 30 mm e 2% de fibras obtiveram uma tensão média de 61.7 MPa.

A partir destes resultados, a autora concluiu que a resistência à compressão aumenta com a percentagem de fibras, sendo que o aumento da espessura de encamisamento não tem uma influência significativa na capacidade de resistência à compressão. Aferiu-se também que os provetes com 0% de fibras registaram os maiores deslocamentos laterais devido ao fato de não possuírem confinamento. Relativamente ao modo de rotura, este foi semelhante em todos os provetes com fibras, tendo-se revelado independente do volume de fibras e da espessura de encamisamento.



Figura 2.25 - Modo característico da rotura [Simão, 2016]

### 3. Campanha Experimental

#### 3.1. Definição da campanha de ensaios

A campanha experimental foi realizada com o principal objetivo de caracterizar mecanicamente os sistemas de TRM e de CRFU à tração uniaxial. Para tal, foram realizados ensaios monotónicos de tração uniaxial em provetes prismáticos com 28 dias de cura. A produção dos provetes e a campanha de ensaios foi realizada no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Os provetes de TRM foram executados com 850 mm de comprimento, 120 mm de largura e 10 de espessura enquanto, os de CRFU possuíam 850 mm de comprimento, 100 mm de largura e 10 mm de espessura. A diferença de largura entre os provetes de TRM e CRFU deve-se pelo facto de as camadas de fibra de carbono (com três fios) utilizadas como armadura possuírem 95 mm de largura pelo que para facilitar a execução dos provetes e a garantir uma boa impregnação das fibras adaptou-se a largura de 120 mm para os provetes de TRM, sendo que para o sistema de CRFU esta alteração não foi necessária. Durante a campanha experimental, produziram-se, no total, 30 provetes de TRM com duas argamassas distintas (*Sika MonoTop 612* e *Secil Reabilita Cal Consolidação*). Fez-se variar o número de camadas de fibra de carbono de modo a aferir a influência da aplicação de diferentes matrizes e da quantidade de camadas de fibras de reforço no comportamento mecânico do sistema quando sujeito à tração uniaxial. Em relação à CRFU foram executados 24 provetes e, de forma a aferir a influência da quantidade de fibras na eficácia do sistema, fez-se variar a percentagem em volume das mesmas entre 0% e 3%.

Tabela 3.1 – Designação e caracterização dos provetes executados

Sistema	Grupo	Nº de provetes	Matriz	Armadura	Fibras	
					Nº camadas	[%]
TRM	Sk - 0	5	Sika - Monotop 612	Fibra de carbono StoBPE NSMG44	-	-
	Sk - 1	5			1	-
	Sk - 2	5			2	-
	Sl - 0	5	Secil - Reabilita Cal Consolidação		-	-
	Sl - 1	5			1	-
	Sl - 2	5			2	-
CRFU	CRFU - 0	6	Calda Cimentícia	Favir - Manta de fibra de aço	-	-
	CRFU - 1	6			-	1
	CRFU - 2	6			-	2
	CRFU - 3	6			-	3

Apesar de todos os provetes terem sido executados, não foi possível ensaiar os provetes dos grupos CRFU-0 e Sl-0 por estes possuírem baixa resistência mecânica e serem demasiado frágeis, pois não possuíam fibras de reforço. Os provetes do grupo CRFU-0 fendilharam durante o processo do aperto

das garras utilizadas no ensaio devido às tensões que surgiram ao longo desse processo. Em relação aos provetes do grupo SI-0, não foi possível retirá-los das cofragens sem estes fendilharem ou serem danificados. Portanto, no total, foram ensaiados 25 provetes de TRM e 18 provetes de CRFU.

### 3.1.1. Procedimento da caracterização mecânica das matrizes

De modo a caracterizar as diversas matrizes utilizadas nos sistemas de reforço, produziram-se provetes prismáticos de dimensões 160x40x40 (mm), uns constituídos por calda cimentícia utilizada no CRFU e outros pelas argamassas utilizadas no TRM. Os provetes de calda cimentícia foram ensaiados segundo os procedimentos presentes na norma DIN 1048-5 (1991), enquanto os provetes de argamassa foram ensaiados segundo a norma BS EN 1015-11.

Após 28 dias de cura, os provetes foram inicialmente ensaiados à flexão e, de seguida, à compressão. Os ensaios à flexão foram realizados na máquina universal de tração *Zwick* (com 50 KN de capacidade de carga) enquanto os ensaios de compressão foram realizados na prensa *Form Test Seidner modelo 3000D* (com capacidade de carga até 3000KN ou uma imposição de deslocamentos até 50 mm).



Figura 3.1 – Execução dos provetes de dimensões 160x40x40 mm



Figura 3.2 – Ensaio à flexão dos provetes de dimensões 160x40x40 (mm) e à compressão dos provetes de dimensões 40x40x40 (mm)



### 3.1.2. Procedimento da caracterização mecânica da fibra de carbono

Atendendo que não existem normas para realizar a caracterização mecânica da fibra de carbono utilizada como armadura nos provetes de TRM à tração uniaxial, decidiu-se utilizar a informação presente em outras bibliografias, tais como [Garmendia, 2010],[Larrinaga, 2011] e [De Santis & Gianmarco, 2014], de forma a poderem ser selecionadas as dimensões dos provetes e a velocidade de ensaio. Foi decidido que os provetes teriam 850 mm de comprimento e 120 mm de largura e seriam constituídos por 3 fios de fibra e, 850 mm de comprimento e 50 mm de largura para os provetes com 1 fio de fibra. Os ensaios foram realizados através de imposição de deslocamentos à velocidade de 1 mm/min.

A rede bidirecional de fibra de carbono utilizada foi a *StoBPE NSMG44* (cuja informação técnica se encontra na tabela 3.3).

Tabela 3.2 - Informação técnica da rede de carbono *StoBPE NSMG44*

Rede de carbono StoBPE NSMG44	
Resistência à tração, $f_{fk}$	5500 N/fio
Módulo de elasticidade (fibra), $E_f$	242 GPa
Extensão última (fibra), $\varepsilon_f$	1,70%
Espessura, $t_f$	1,2 mm
Largura	1 m
Abertura	340 x 340 (mm)
Peso da fibra em 2 direções	159 g/m <sup>2</sup>
Peso da fibra numa direção	79,5 g/m <sup>2</sup>



Figura 3.3 - Rede de carbono bidirecional *StoBPE NSMG44*

Para averiguar a informação técnica fornecida pelo fabricante da rede de carbono, executaram-se, numa primeira campanha, 3 provetes de um fio e 3 provetes com três fios de fibra de carbono. De modo a executar os provetes, procedeu-se inicialmente ao tratamento das chapas que iriam conter a fibra através de uma lixa, com o objetivo de aumentar a sua rugosidade superficial e, consequentemente, aumentar o atrito entre a chapa e as garras de modo a evitar o escorregamento do provete em relação às mesmas (o que invalidaria os resultados do ensaio). De seguida, aplicou-se uma resina epoxídica fornecidas pela empresa *HILTI* de modo a envolver a fibra e preencher os espaços existentes entre as chapas metálicas e a fibra (Figura 3.4 (a) e (b)). Finalmente, colocaram-se as chapas metálicas (superiores), retirando-se o excesso de resina aplicada (figura 3.4 (c)), tendo-se colocado de seguida pesos adicionais no topo dos provetes de forma a garantir a aderência da resina à chapa na fase inicial do processo de cura (figura 3.4 (d)).

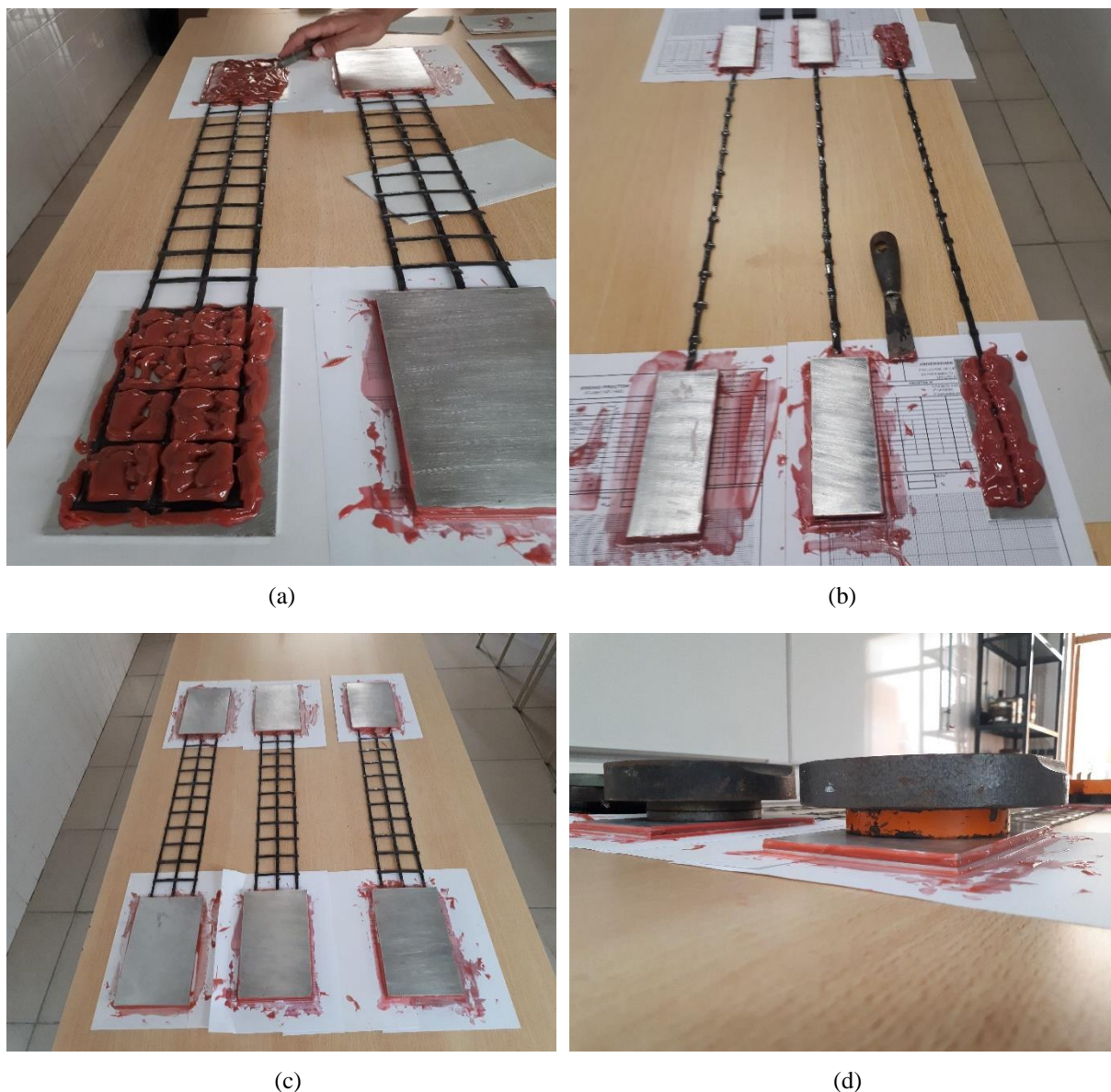


Figura 3.4 – Processo de execução dos provetes de fibra de carbono, a) e b) Aplicação da resina, c) Colocação das chapas metálicas superiores, d) Colocação dos pesos adicionais



Após um período de cura de 7 dias, os provetes foram ensaiados à tração uniaxial na máquina universal de tração *Zwick* com o objetivo de se obter a resistência à tração e o módulo de elasticidade da fibra de carbono.. Os resultados da caracterização mecânica da primeira campanha da fibra de carbono encontram-se no capítulo 4.1.2 (Figura 4.1 e 4.2).



(a)



(b)

Figura 3.5 – a) Vista geral do ensaio de tração de fibra (1 fio), b) Modo de rotura do provete



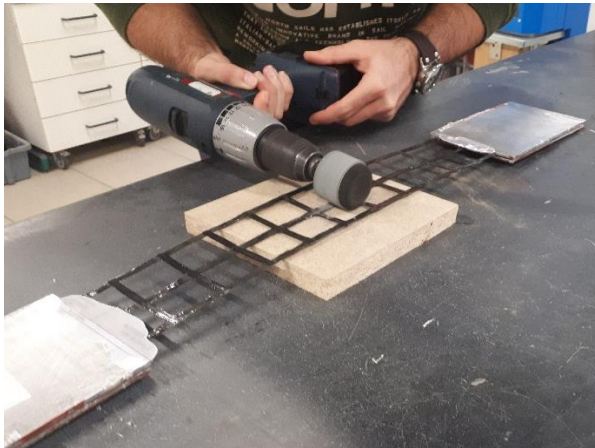
(a)



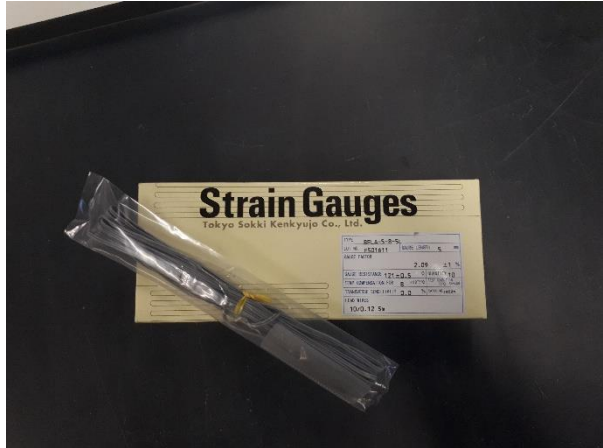
(b)

Figura 3.6 – a) Vista geral do ensaio de caracterização de fibra (3 fios), b) Modo de rotura do provete

De modo a aferir a os deslocamentos obtidos através do extensómetro mecânico da *Zwick*, foram realizados numa segunda fase de ensaios, 3 provetes (com três fios de fibra), tendo-se colocado para o efeito um extensómetro elétrico (TML BFLA-5-8-5L) por provete, no fio do meio a meia altura. Para a colocação do extensómetro elétrico retirou-se a camada de resina superficial presente nas fibras (Figura 3.7 (a)), tendo-se colado de seguida o extensómetro (Figura 3.7 (c) e (d)). Após a colocação dos extensómetros, os provetes foram ensaiados à tração uniaxial até à rotura. Os valores de força e extensão obtidos na segunda campanha de ensaios encontram-se no capítulo 4.1.2 (Figura 4.3).



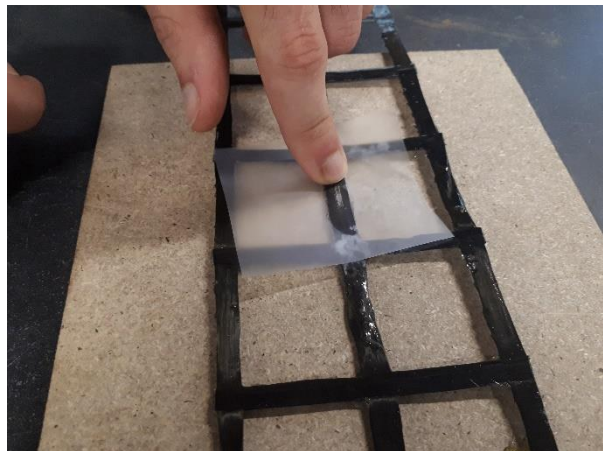
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.7 – Processo de colocação do extensómetro, a) Remoção da resina, b) Extensómetro eléctrico utilizado, c) e d) Colocação do extensómetro no provete

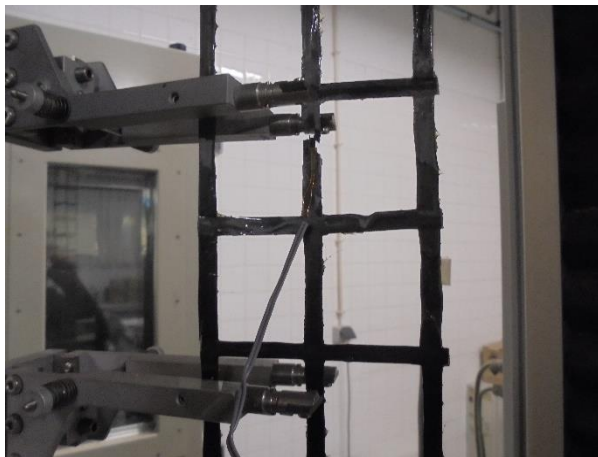




(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.8 – a) Vista geral do ensaio de caracterização da fibra, b), c), d) Modos de rotura dos provetes

### 3.1.3. Execução dos provetes de TRM e CRFU

De modo a executar os provetes de TRM e de CRFU foram concebidas cofragens em acrílico utilizando placas com 10 mm de espessura. Optou-se pela utilização de acrílico como cofragem, pois era necessário um material com elevada rigidez, de forma a suportar o processo de vibração e que ao mesmo tempo fosse transparente e que permitisse observar, parar ou alterar o processo de execução dos provetes. Por outro lado, pretendia-se um material que simplificasse o processo de montagem, desmontagem e limpeza, de forma a otimizar a produção do elevado número de provetes.

Os provetes de TRM foram executados com duas matrizes distintas, tendo-se utilizado uma e duas camadas de fibras de carbono como armadura principal do compósito (com 850 mm de comprimento e 100 mm de largura). De modo a tentar garantir que a rotura do provete ocorre na zona de medição do defletómetro (LVDT), reforçou-se a área dos provetes na zona de fixação dos mesmos onde as garras seriam utilizadas, de forma a mitigar a concentração de tensões que se originam devido ao aperto das garras, evitando assim que a rotura ocorra na zona das garras.

A aplicação de diferentes matrizes e a variação do número de camadas de reforço principal nos provetes de TRM foram feitas de modo a aferir a eficácia do reforço e do tipo de matriz na resistência à tração uniaxial.

#### **Sistema TRM com argamassa Sika**

Na produção dos provetes com argamassa *Sika MonoTop 612*, as camadas de fibra de reforço secundário foram fixas à camada de reforço principal através de agrafos, sendo que o espaçamento entre fibras foi realizado através da utilização de chapas metálicas (Figura 3.9 (a)). Este processo foi necessário de forma a garantir uma espessura de 10 mm (devido à baixa fluidez e trabalhabilidade da argamassa). Durante o processo de betonagem, utilizou-se um vibrador de agulha para espalhar a argamassa mais facilmente e evitar deficiências na impregnação das fibras.

No final, o provete foi regularizado com uma pá de pedreiro, tendo-se retirado o excesso de argamassa. O provete foi descofrado ao fim de 24 horas e coberto por um pano húmido de forma a evitar a formação de fendas devido à retração da argamassa.

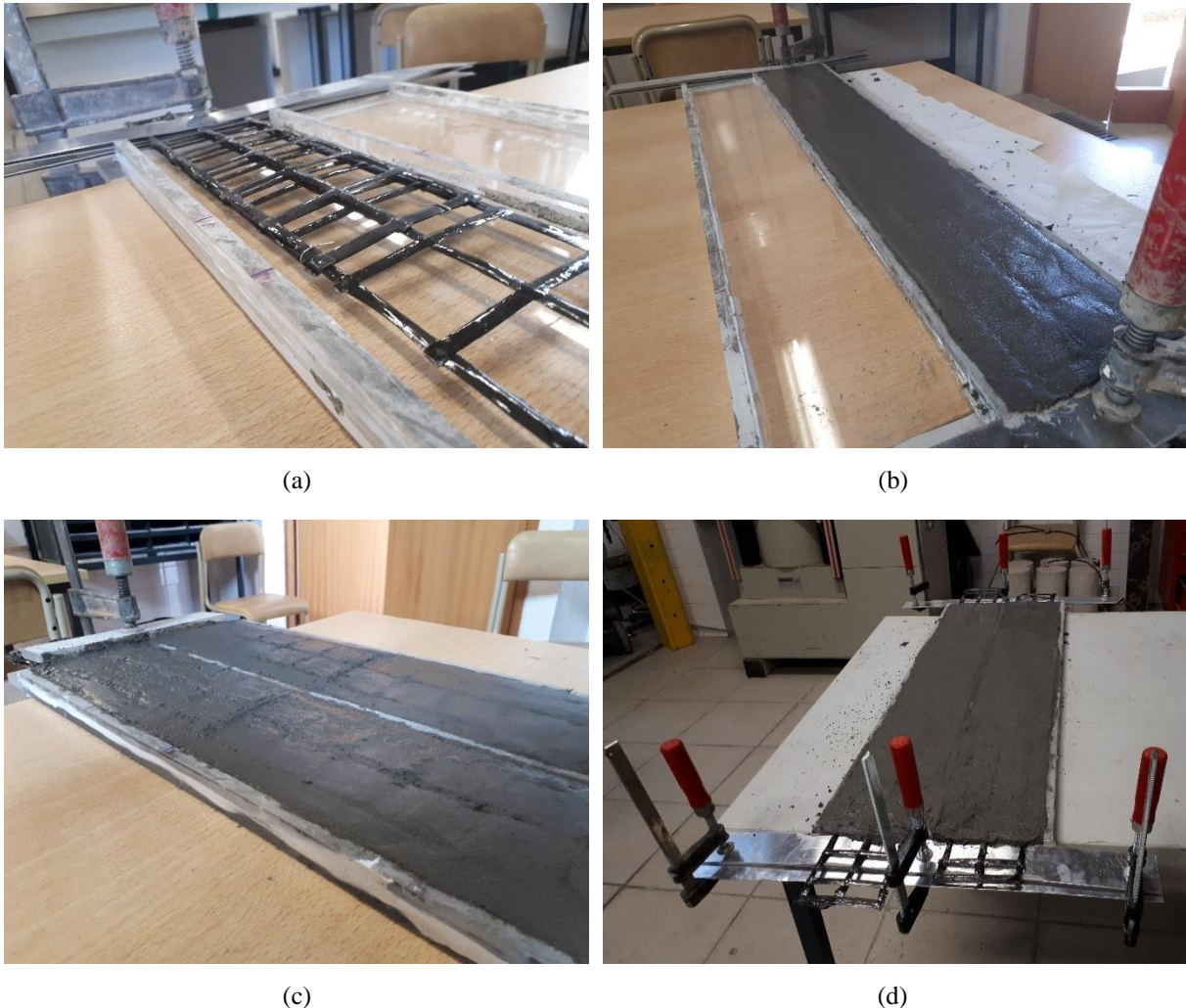


Figura 3.9 – a) Colocação da fibra de carbono, b), c), d) Execução dos provetes de TRM com argamassa *Sika MonoTop 612*

#### **Sistema TRM com argamassa Secil**

Na execução dos provetes de TRM com argamassa *Secil Reabilita Cal Consolidação*, não foi necessária a utilização de agramos nem de chapas metálicas, pois esta possui uma fluidez e trabalhabilidade superiores à argamassa *Sika MonoTop 612*. A execução destes provetes fez-se colocando inicialmente uma camada de argamassa, seguida da colocação das camadas de reforço e, por fim, da última camada de argamassa aplicada, com o auxílio do vibrador de agulha (Figura 3.10 (a), (b) e (c)).

De seguida, realizaram-se os passos de regularização dos provetes, ficando estes 5 dias no interior das cofragens, cobertos por panos húmidos (Figura 3.10 (d)) até atingirem uma resistência mecânica que permitisse a descofragem dos mesmos sem os danificar ou fendilhar.



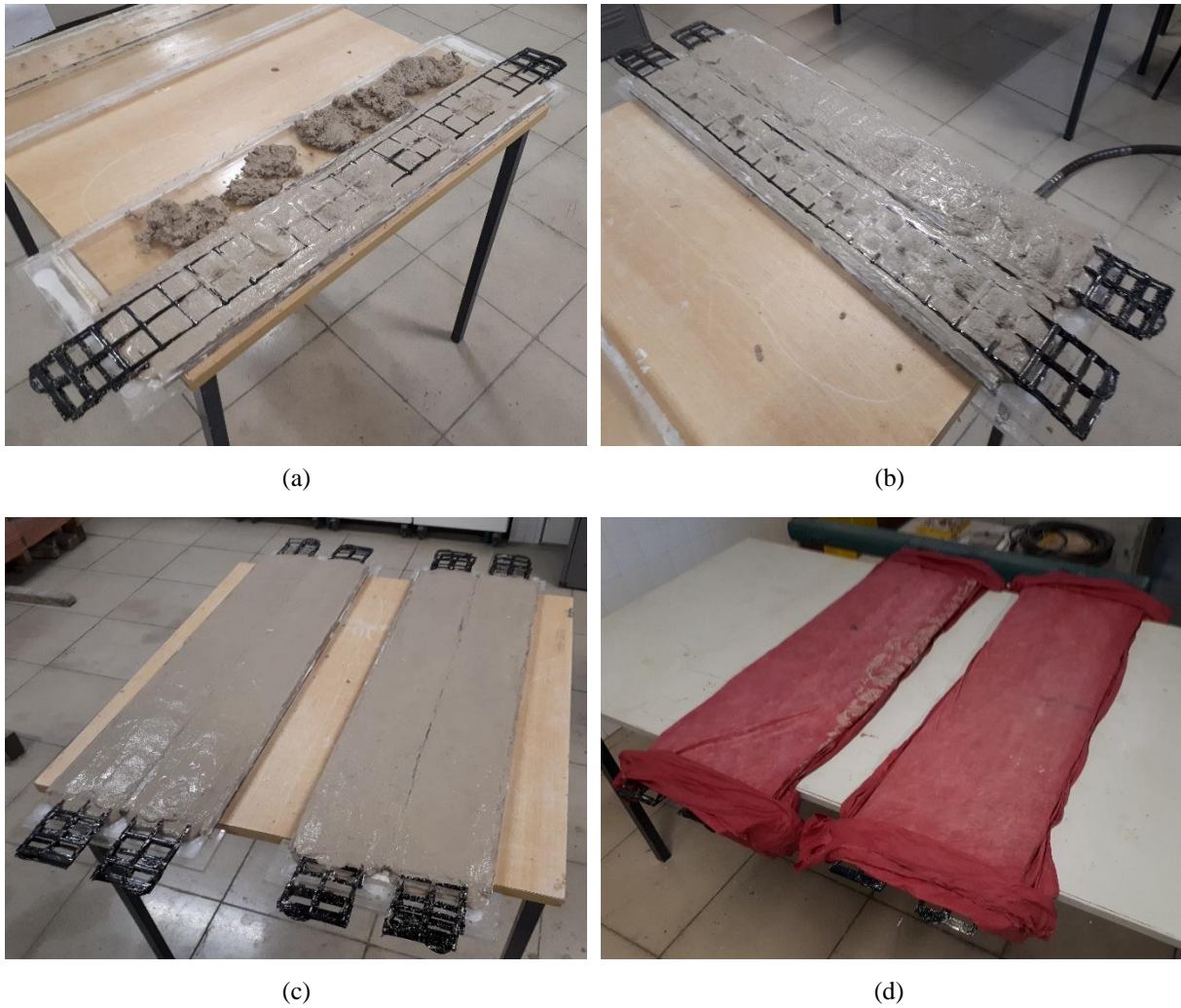


Figura 3.10 – a), b), c) Execução dos provetes de TRM com argamassa Secil Reabilita Cal,  
d) Colocação dos panos húmidos

### **Sistema CRFU**

Os provetes de CRFU foram executados sempre com a mesma matriz (calda cimentícia), tendo esta calda sido utilizada noutros trabalhos experimentais. A produção da calda seguiu os passos descritos em [Gião, 2012], ou seja, primeiro mistura-se a seco o cimento e a sílica fumo (Figura 3.11 (a)), introduz-se em seguida 90% da quantidade de água de amassadura e mistura-se durante 3 minutos, depois introduz-se os restantes 10% de água de amassadura e a totalidade de superplastificante e, por fim, mistura-se durante 3 minutos a velocidade constante (Figura 3.11 (b)).



Figura 3.11 – Processo de execução da calda cimentícia, a) Mistura a seco do cimento e sílica, b) Mistura dos 10% de água e superplastificante, c) Colocação da calda para betonagem dos provetes

Na execução dos provetes, fez-se variar a percentagem em volume de fibra de aço entre os 0%, 1%, 2% e os 3%. Esta variação teve por objetivo aferir a eficiência do reforço à tração uniaxial. Na zona das garras, foi colocada malha de aço de baixa resistência agafada à fibra, de modo a evitar que a rotura dos provetes ocorresse nesta zona. Inicialmente, colocou-se a fibra de aço no interior das cofragens de acrílico com a ajuda de espátulas metálicas (figura 3.12 (a)). Após a colocação da fibra, selou-se as extremidades da cofragem com silicone de modo a evitar possíveis fugas da calda cimentícia durante o processo de enchimento do molde (visto a matriz ser bastante fluida). De seguida, produziu-se a calda cimentícia e procedeu-se ao enchimento dos moldes dos provetes com o auxílio de um vibrador de agulha (Figura 3.12 (b) e (c)), de maneira a garantir uma boa impregnação das fibras de aço, e a diminuir assim o número de vazios. Por fim, os provetes foram cobertos por um pano húmido durante 24 horas (Figura 3.12 (e)) para ganharem a resistência mecânica suficiente que permitisse a sua descofragem.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.12 – Processo de execução dos provetes de CRFU, a) Colocação das fibras de aço na cofragem, b), c), d) Betonagem do provete, e) colocação dos panos húmidos

### 3.1.4. Cura dos provetes

Após serem descofrados, os provetes foram sujeitos a uma cura húmida durante 28 dias. Estes foram colocados de forma a não estarem sujeitos à flexão (Figura 3.13 (a)), o que criaria deformações nos provetes afetando assim os resultados dos ensaios (à tração simples). Durante este processo, observou-se o aparecimento de corrosão das fibras (nas zonas onde estas ficaram expostas) nos provetes de CRFU (Figura 3.13 (b)). Apesar do surgimento dessa corrosão, o mesmo não afetou os provetes, visto a corrosão ser apenas superficial e concentrar-se apenas na zona das garras.



Passados 28 dias, os provetes foram retirados da cura e colocados à temperatura ambiente durante 24 horas até serem ensaiados.

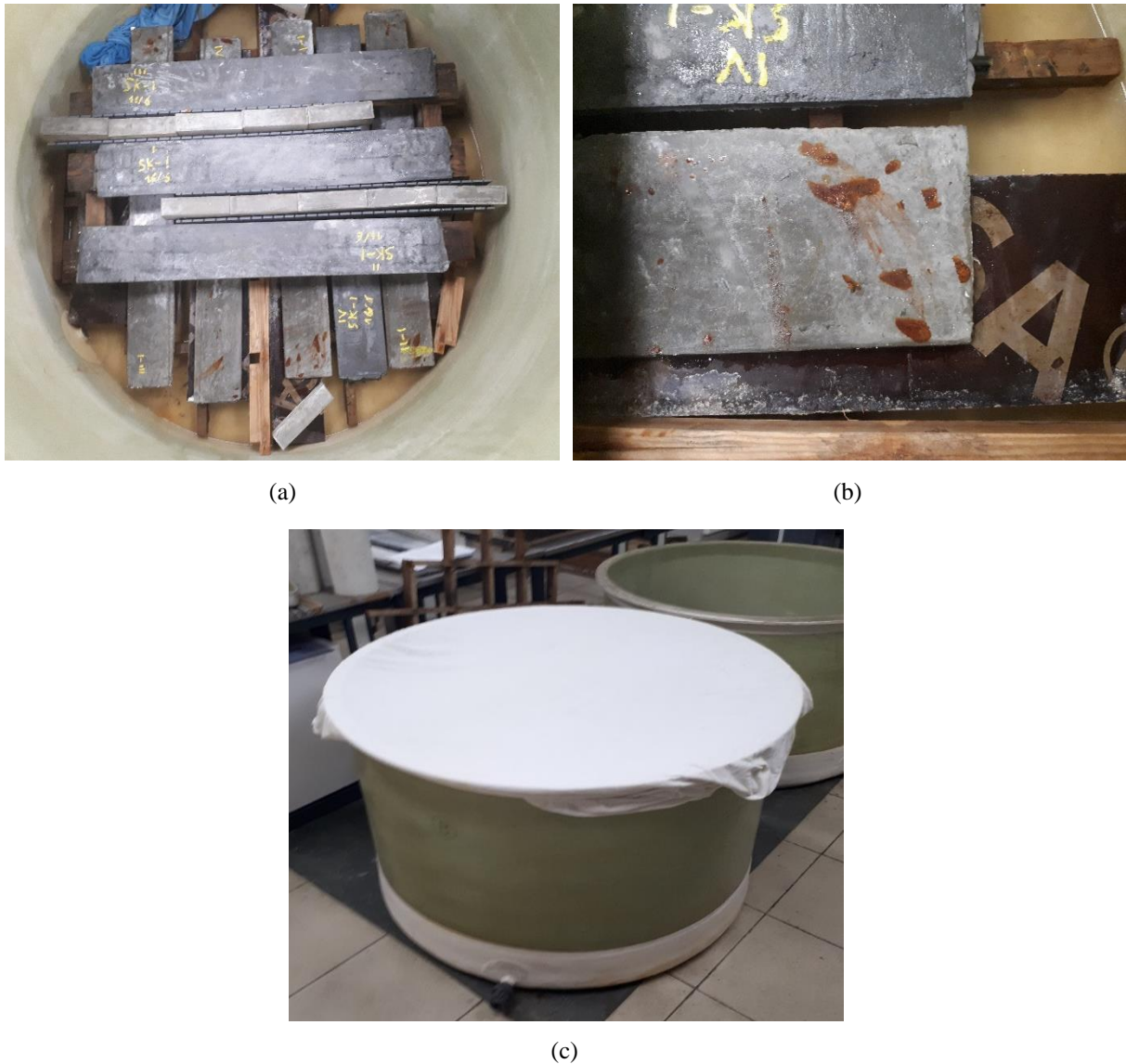


Figura 3.13 – a) Colocação dos provetes no tanque de cura b) Aparecimento de ferrugem nos provetes de CRFU, c) Processo de cura dos provetes e aparecimento de corrosão nos provetes de CRFU

Antes de serem ensaiados, todos os provetes foram pesados e medidos de modo a se poder comparar ou justificar eventuais diferenças nos resultados obtidos. Os dados da pesagem e medição das dimensões de todos os provetes ensaiados encontram-se explicitados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Características dos provetes ensaiados (dimensões e peso)

Provetes	Características dos provetes				
	Comprimento	Largura	Excessura	W	W, med
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[g]
SK - 0 - 1	854	122	11	2440	2484
SK - 0 - 2	853	121	11	2365	
SK - 0 - 3	852	122	10	2590	
SK - 0 - 4	854	122	9	2555	
SK - 0 - 5	855	121	11	2470	
SK - 1 - 1	852	122	9	2425	2571
SK - 1 - 2	851	121	9	2490	
SK - 1 - 3	852	121	10	2635	
SK - 1 - 4	852	122	11	2665	
SK - 1 - 5	852	123	9	2640	
SK - 2 - 1	852	122	11	2630	2649,2
SK - 2 - 2	853	122	13	2670	
SK - 2 - 3	853	122	12	2566	
SK - 2 - 4	854	123	11	2725	
SK - 2 - 5	855	122	12	2655	
SL - 1 - 1	851	122	9	2715	2741
SL - 1 - 2	852	122	10	2700	
SL - 1 - 3	852	121	9	2800	
SL - 1 - 4	851	122	11	2760	
SL - 1 - 5	852	121	10	2730	
SL - 2 - 1	852	122	11	2900	2854
SL - 2 - 2	852	121	10	2860	
SL - 2 - 3	851	121	10	2855	
SL - 2 - 4	852	121	11	2880	
SL - 2 - 5	851	121	10	2775	
CRFU - 1 - 1	852	105	10	2360	2297,5
CRFU - 1 - 2	851	105	10	2245	
CRFU - 1 - 3	852	105	11	2370	
CRFU - 1 - 4	852	102	10	2365	
CRFU - 1 - 5	853	103	11	2240	
CRFU - 1 - 6	852	102	11	2205	
CRFU - 2 - 1	851	102	11	2405	2414,2
CRFU - 2 - 2	853	104	10	2390	
CRFU - 2 - 3	852	102	11	2460	
CRFU - 2 - 4	852	103	11	2395	
CRFU - 2 - 5	851	102	11	2425	
CRFU - 2 - 6	852	103	11	2410	
CRFU - 3 - 1	852	101	11	2545	2512,5
CRFU - 3 - 2	852	102	11	2530	
CRFU - 3 - 3	851	101	11	2490	
CRFU - 3 - 4	852	102	12	2475	
CRFU - 3 - 5	852	102	11	2510	
CRFU - 3 - 6	851	102	12	2525	

Onde: W representa a massa dos provetes

$W_{\text{méd}}$  representa a média da massa dos provetes



### 3.1.5. Obtenção do campo de deslocamentos através da técnica DIC

De modo a melhor avaliar o comportamento dos provetes ensaiados, utilizou-se um software que permite a obtenção do campo de deslocamentos dos mesmos através da técnica DIC (Digital Image Correlation) que permite a correlação das imagens digitais ao longo do ensaio. Desta forma pretendeu-se comparar os diagramas força-deslocamento, analisar a abertura de fendas e o campo de deslocamentos em cada provete. Para tal, utilizou-se o programa *GOM Correlate*.

O *GOM Correlate* é um software que permite correlacionar imagens digitais através de um método ótico que possibilita a medição de coordenadas 2D ou 3D, o que permite avaliar campos de deformação, como deslocamentos ou extensões. Para o cálculo de deslocamentos (no plano da superfície) do provete, é possível criar com o software uma grelha computacional nas imagens digitais obtidas (denominada por região de interesse) onde o deslocamento relativo de cada ponto da grelha corresponde à distância relativa entre a sua posição na imagem de referência (indeformada) e a imagem deformada.

Os resultados obtidos a partir da correlação de imagens digitais, são inicialmente, pixéis computacionais que posteriormente são convertidos em deslocamentos, geralmente, a partir do conhecimento de uma dimensão real que permita definir a escala da análise. Este software é aplicado em diversas áreas, como a indústria automóvel, a aeroespacial, ou a engenharia civil (monotorização e análise de danos estruturais, ensaios de segurança estrutural), em especial na caracterização de materiais através da análise de ensaios à tração, corte e flexão (Figura 3.14) [GOM Correlate, 2017].

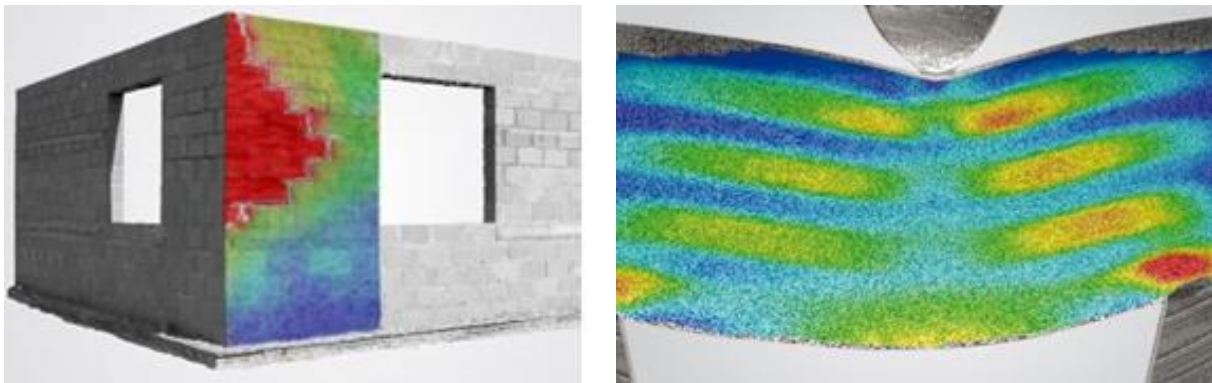


Figura 3.14 – Exemplos de aplicação do software *GOM Correlate* [GOM Correlate, 2017]

Para se poder utilizar as potencialidades do software, é necessário criar um padrão estocástico na área a analisar, pois o programa processa as coordenadas 2D e 3D do objeto com base nesse padrão. Logo a deformação do padrão estocástico representa a deformação do objeto.

Para se criar o padrão estocástico, é necessário que o objeto seja limpo de qualquer gordura ou óleo, aplicando-se em seguida um primário de tinta branca nas zonas a avaliar (Figura 3.15 (a)). Após o primário secar salpica-se o objeto com tinta preta (Figura 3.15 (b)) por forma a obter o padrão aleatório pretendido.

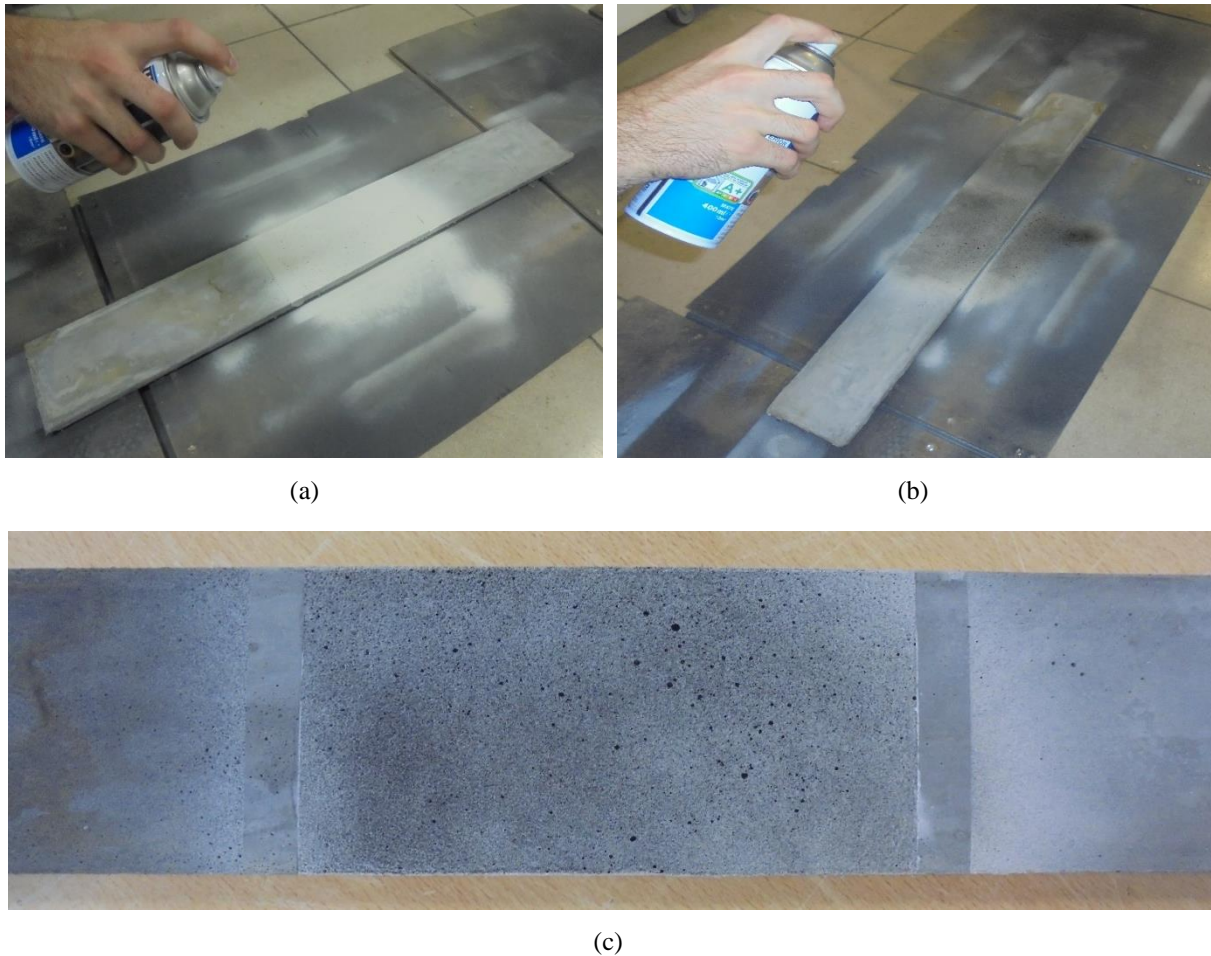


Figura 3.15 – Processo de criação do padrão estocástico, a) Aplicação do primário, b) Aplicação de tinta preta, c) Padrão estocástico obtido

Durante o ensaio de tração uniaxial, e depois de criado o padrão estocástico, realizou-se a aquisição das imagens 2D através de uma máquina fotográfica de alta resolução (Cannon EOS 550D). De modo a diminuir o surgimento de possíveis erros de medição, foi necessário ter alguns cuidados durante o processo de obtenção das imagens digitais. A máquina foi colocada a uma distância que permitisse capturar na totalidade a área de análise, tendo esta que estar perpendicular à área do provete que se pretendia analisar, de forma a evitar a captura inadequados dos deslocamentos (devido, eventualmente, ao movimento para fora do plano que pode surgir durante o ensaio). Durante a realização dos ensaios, utilizou-se um holofote de forma a manter constante a luminosidade presente no laboratório e a melhorar a qualidade das imagens digitais (Figura 3.16). O intervalo mínimo de tempo possível para a aquisição das imagens digitais está limitado pelo software a 5 segundos. De modo a definir a escala de medição no software, foi colocada na primeira foto uma régua, ao lado do provete.

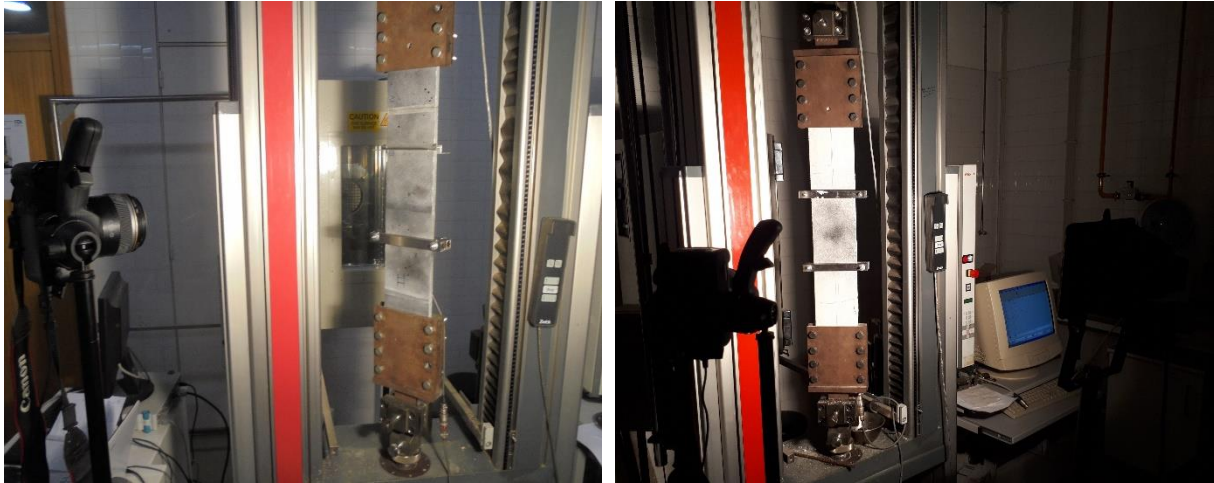


Figura 3.16 – Sistema de captura de fotografias dos provetes

### 3.1.6. Ensaios preliminares de tração uniaxial

Como foi referido anteriormente, o ensaio de tração uniaxial tem como objetivos a obtenção do diagrama força-deslocamento, a determinação da tensão de rotura, da extensão última e do módulo de elasticidade, bem como o tipo de rotura obtido, compreendendo desta forma o comportamento mecânico dos provetes de TRM e CRFU. Todos os provetes foram ensaiados até à rotura na máquina de tração universal *Zwick*.

Não existindo uma norma específica em que se enquadrem o tipo de ensaios realizados, executaram-se testes preliminares (Figura 3.17) de forma a determinar a velocidade do ensaio e a otimizar o sistema de captura de imagens digitais. Após a realização dos testes preliminares, optou-se pela utilização de uma velocidade de 0.5 mm/min.

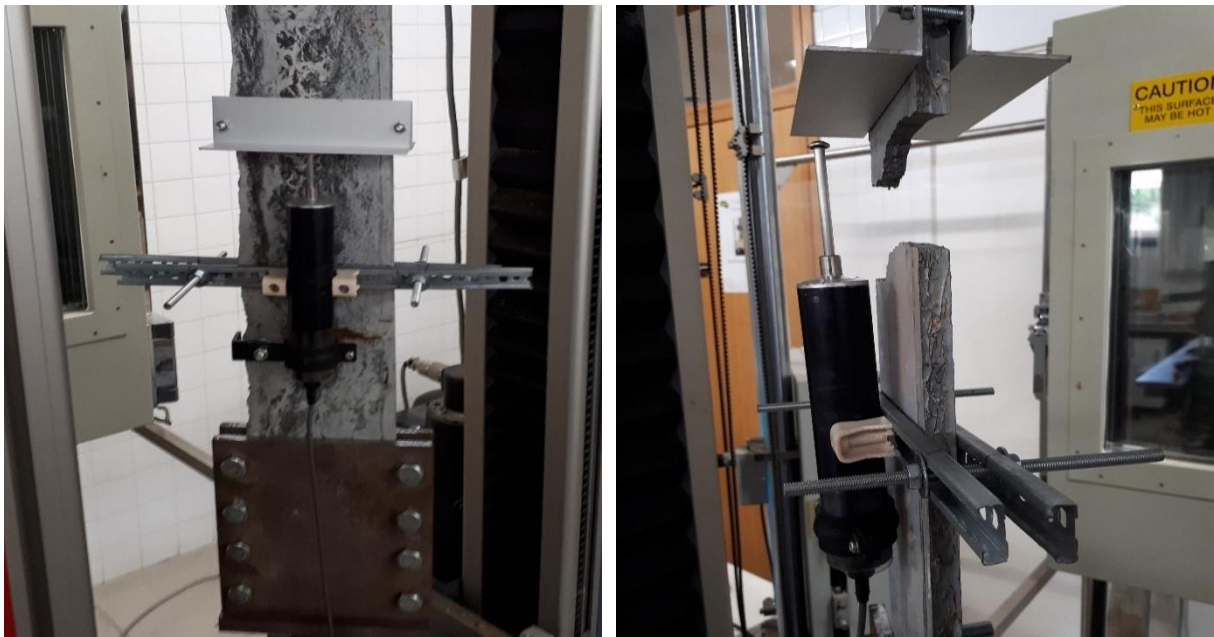


Figura 3.17 – Realização dos ensaios preliminares de tração uniaxial



### 3.1.7. Ensaios de tração uniaxial

Para a realização dos ensaios, utilizaram-se garras específicas que foram previamente niveladas (Figura 3.18) de modo a evitar eventuais excentricidades e a garantir que os provetes ensaiados estariam sujeitos a tração uniaxial pura.

Para a medição dos deslocamentos colocou-se um LVDT a meia altura dos provetes, sendo a distância analisada de 200 mm. De modo a garantir no ensaio uma distância inicial de medição de 200 mm utilizou-se para o efeito uma bitola metálica. O batente do sistema foi materializado por uma chapa metálica em L, tendo o LVDT sido centrado em relação a cada provete e ao batente de forma a minimizar erros de medição dos deslocamentos (Figura 3.19). Para a aquisição de dados, o LVDT foi ligado a um *Datalogger Spider 8* e, a partir do software *Catman* da *HBM*, registaram-se os deslocamentos. Por sua vez, a força aplicada foi registada pela máquina *Zwick* (Figura 3.20).

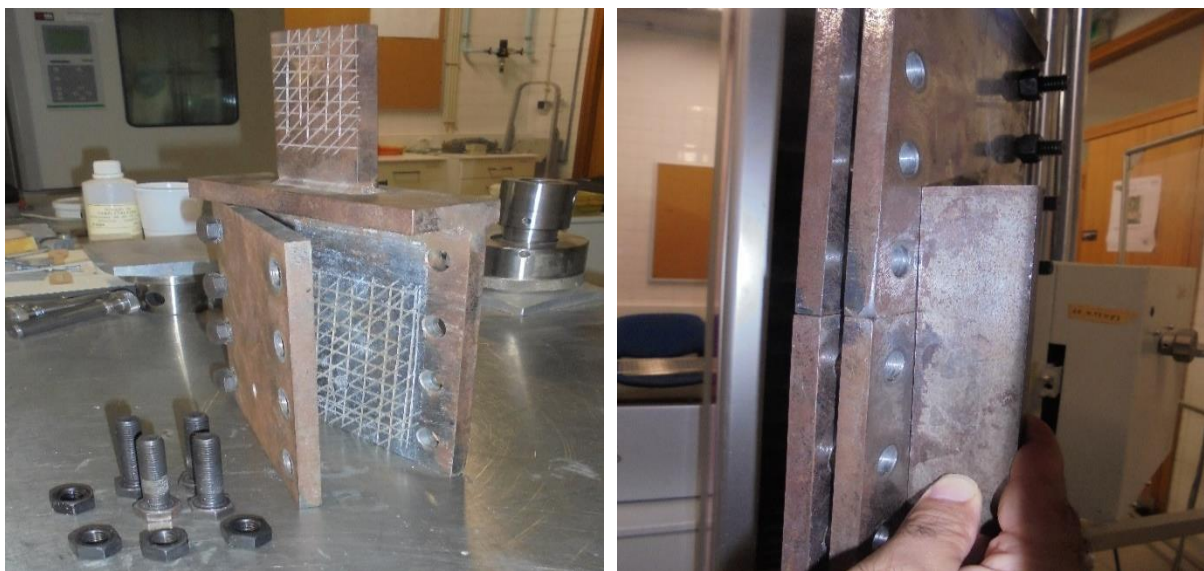


Figura 3.18 – Garras utilizadas e processo de nivelamento



Figura 3.19 – Sistema de medição dos deslocamentos (otimizado)



Figura 3.20 – Disposição geral da instrumentação durante a campanha de ensaios



## 4. Apresentação e discussão dos resultados

Neste capítulo faz-se a apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios experimentais através de diagramas força-extensão, tabelas com o resumo dos principais parâmetros, complementados com a discussão dos mesmos. As tabelas relativas ao sistema de reforço de TRM incluem o valor de força, tensão e extensão de rotura e o módulo de elasticidade da terceira fase (de pós fendilhação onde apenas as fibras suportam a carga aplicada).

Nos diagramas referentes aos resultados dos ensaios das séries Sk e Sl do sistema TRM (reforçadas com fibra de carbono) é possível observar o comportamento das três fases previamente descritas no capítulo 2, as quais não se verificam no sistema de CRFU. As tabelas relativas ao sistema de reforço CRFU incluem o valor de força, tensão (em relação à área do compósito), extensão de rotura e o módulo de elasticidade do compósito.

### 4.1. Caracterização dos materiais

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados de caracterização mecânica das diversas matrizes aplicadas nos sistemas de reforço e da fibra de carbono. Os procedimentos utilizados para a execução dos provetes e para a realização dos ensaios encontram-se descritos nos capítulos 3.1.1 e 3.1.2.

#### 4.1.1. Caracterização mecânica das matrizes

Os resultados obtidos para as diversas matrizes encontram-se descritos nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 onde,  $f_f$  representa a tensão de rotura à tração por flexo-tração e  $f_c$  a tensão de rotura à compressão.

Da análise dos resultados constata-se que o valor médio da resistência à tração por flexão da argamassa *Sika MonoTop 612* é 9.9 MPa, da argamassa *Secil Reabilita Cal Consolidação* é 1.7 MPa enquanto o valor obtido para a Calda Cimentícia foi de 9.6 MPa. No que diz respeito à resistência à compressão o valor médio da argamassa *Sika MonoTop 612* foi de 66.1 MPa, da argamassa *Secil Reabilita Cal Consolidação* foi de 2.9 MPa enquanto o valor obtido para a Calda Cimentícia é de 108.4 MPa.

A partir da análise das fichas técnicas fornecidas pelos fabricantes das matrizes constata-se que, aos 28 dias, o valor esperado de resistência à tração por flexão é de 8.3 MPa para a argamassa *Sika MonoTop 612*, sendo que para a argamassa *Secil Reabilita Cal Consolidação* e para o cimento Portland CEM I 42.5R esta informação não é fornecida. Em relação à resistência à compressão aos 28 dias, os valores fornecidos pelas fichas técnicas da argamassa *Sika MonoTop 612*, da argamassa *Secil Reabilita Cal Consolidação* e do cimento Portland CEM I 42.5R são respetivamente 40.3 MPa, 3.3 MPa e 62.5 MPa.

Note-se que de modo a se obter a Calda Cimentícia é necessário misturar sílica fumo e superplastificante ao cimento Portland CEM I 42.5R, logo é normal os valores de resistência dos provetes de Calda Cimentícia serem superiores aos apresentados na ficha técnica.

Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios dos provetes 160x40x40 mm de argamassa *Sika MonoTop 612*

		Ensaio à flexão			Ensaio à compressão		
Matriz	Provete	Força [N]	$f_f$ [MPa]	Média [MPa]	Força [N]	$f_c$ [MPa]	Média [MPa]
Sika Monotop 612	1	2814	10,6	9,9	92000	57,5	66,1
					91000	56,9	
	2	2807	10,5		119000	74,4	
					101000	63,1	
	3	2482	9,3		100000	62,5	
					95000	59,4	
	4	2143	8,0		100000	62,5	
					110000	68,8	
	5	2876	10,8		113000	70,6	
					107000	66,9	
	6	2655	10,0		122000	76,3	
					119000	74,4	

Tabela 4.2 - Resultados dos ensaios dos provetes 160x40x40 mm de argamassa *Secil Reabilita Cal Consolidação*

		Ensaio à flexão			Ensaio à compressão		
Matriz	Provete	Força [N]	<i>ff</i> [MPa]	Média [MPa]	Força [N]	<i>fc</i> [MPa]	Média [MPa]
Secil Reabilita Cal Consolidação	1	491	1,8	1,7	4849	3,0	2,9
					4885	3,1	
	2	495	1,9		4771	3,0	
					4492	2,8	
	3	405	1,5		4565	2,9	
					4695	2,9	
	4	442	1,7		4324	2,7	
					4415	2,8	
	5	458	1,7		4520	2,8	
					4633	2,9	
	6	422	1,6		4908	3,1	
					4817	3,0	

Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios dos provetes 160x40x40 mm de Calda Cimentícia

		Ensaio à flexão			Ensaio à compressão		
Matriz	Provete	Força [N]	$ff$ [MPa]	Média [MPa]	Força [N]	$fc$ [MPa]	Média [MPa]
Calda Cimentícia	1	2456	9,2	9,6	166000	103,8	108,4
					175000	109,4	
	2	2395	9,0		168000	105,0	
					170000	106,3	
	3	2645	9,9		179000	111,9	
					172000	107,5	
	4	2728	10,2		169000	105,6	
					165000	103,1	
	5	2873	10,8		180000	112,5	
					172000	107,5	
	6	2295	8,6		184000	115,0	
					181000	113,1	



#### 4.1.2. Caracterização mecânica da fibra de carbono

A ficha técnica fornecida pela *StoBPE* (Tabela 3.3) não indica a espessura da fibra de carbono ou a sua densidade apesar dessas características serem cruciais para o cálculo da área do fio de fibra de carbono. Pelo que se recorreu à bibliografia existente [Larrinaga, 2011] e a fichas técnicas de outros fabricantes de redes de fibra de carbono, como a *S&P*, tendo-se considerado para efeito o valor de  $1.78 \text{ g/cm}^3$ .

Desde modo, foi possível calcular a espessura do fio da fibra obtida a partir do quociente entre o peso da fibra (numa direção) e a densidade da fibra, obtendo-se uma espessura de  $0.0447 \text{ mm}$  e, visto a rede possuir  $22 \text{ fios/m}$ , obteve-se então uma área de  $2.03 \text{ mm}^2/\text{fio}$  (valor utilizado na tabela 4.4 no cálculo da tensão suportada pelos provetes de fibra de carbono).

Nas Figuras 4.1 e 4.2 apresentam-se os diagramas força-extensão obtidos dos ensaios da primeira campanha para os provetes com três fios de CFRP e para os provetes com um fio de CFRP, respetivamente, e na Tabela 4.4 os valores da força, tensão e extensão na rotura, bem como o módulo de elasticidade de todos os provetes de fibra de carbono (da primeira e segunda campanha), ensaiados à tração uniaxial. As forças e os deslocamentos nos provetes foram medidos através da célula de carga e do extensómetro mecânico incorporado na máquina de tração *Zwick*. Relativamente à nomenclatura indicada, as iniciais FC correspondem aos provetes de fibra carbono, 1 ou 3 representa, o número de fios de carbono, a letra Z indica que os valores da extensão foram obtidos através do extensómetro mecânico da *Zwick*, e, por fim, n1 a n3 correspondem ao número do provete. Em todos os provetes ensaiados, constatou-se que a rotura ocorreu perto da zona das garras.

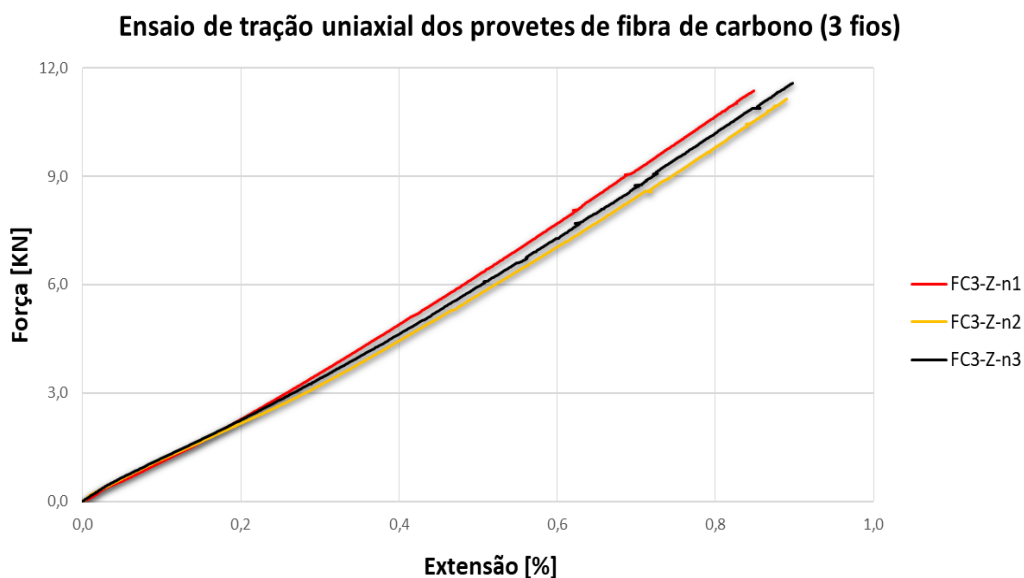


Figura 4.1 - Gráfico força-extensão dos provetes de fibra de carbono (3 fios) sujeitos a tração uniaxial

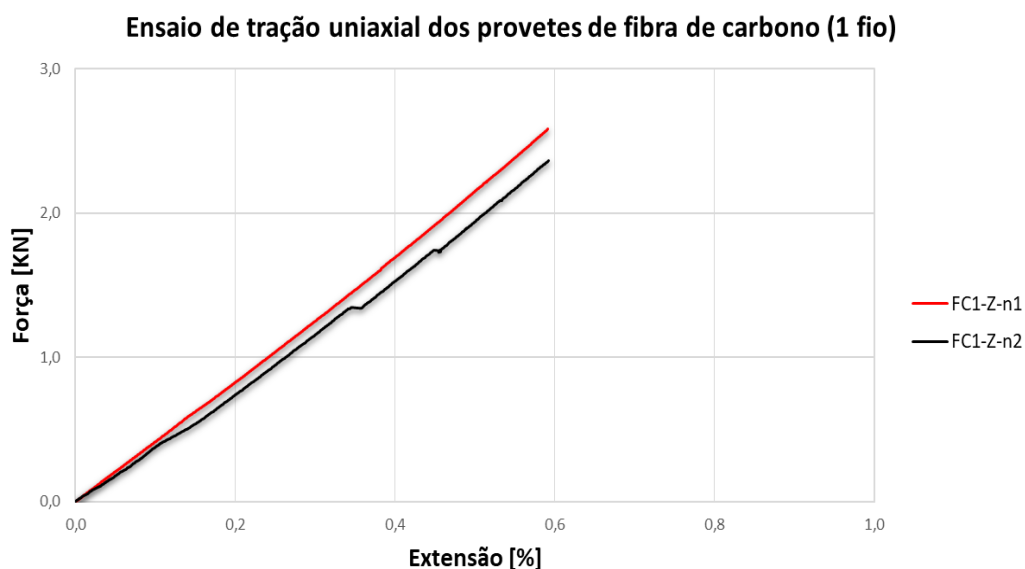


Figura 4.2 - Gráfico força-extensão dos provetes de fibra de carbono (1 fio) sujeitos a tração uniaxial

Os valores máximos obtidos para a força, tensão e extensão na rotura na segunda campanha de ensaios encontram-se indicados na Tabela 4.4. Da análise dos resultados, constata-se que os valores obtidos foram inferiores aos obtidos na primeira campanha experimental. Tendo-se observado que a rotura acabou por ocorrer, neste caso, a meio do provete, possivelmente devido à preparação da fibra para colocação do extensómetro elétrico.

A tensão de rotura indicada na Tabela 4.4 foi calculada a partir do quociente entre a força máxima por fio e a área do fio, ou seja,  $\sigma_r = \frac{F_r}{A_f}$ , enquanto a extensão (para os provetes em que se utilizou o extensómetro mecânico da Zwick) foi calculada a partir do quociente entre o deslocamento observado e a abertura do extensómetro mecânico (100 mm), isto é,  $\varepsilon_r = \frac{\delta}{100}$  sendo que, nos provetes onde se colaram os extensómetros elétricos, a extensão foi obtida diretamente dos mesmos.

Através da análise da Tabela 4.4 constata-se que o valor médio da força de rotura por fio foi de 2863 N e que o valor médio da extensão na rotura observado nos ensaios foi de 0.73% (Tabela 4.4), o que é relativamente baixo para este tipo de material, cujos valores usuais de extensão na rotura se situam entre 1% e 1,5%. O módulo de elasticidade de 191 GPa foi calculado com base na média dos valores experimentais e admitindo que o material apresenta um comportamento elástico linear. Refira-se que o fabricante apresenta para esta rede de fibra de carbono, um valor máximo de força por fio de 5500 N, uma extensão máxima na rotura de 1,7% e um módulo de elasticidade de 242 GPa, valores estes que divergem significativamente dos obtidos experimentalmente.

Relativamente às características mecânicas à tração dos fios de aço utilizados no sistema de CRFU, consideraram-se os valores obtidos em [Gião, 2012] e mencionados no capítulo anterior (ver Figura 2.12 e Tabela 2.1).

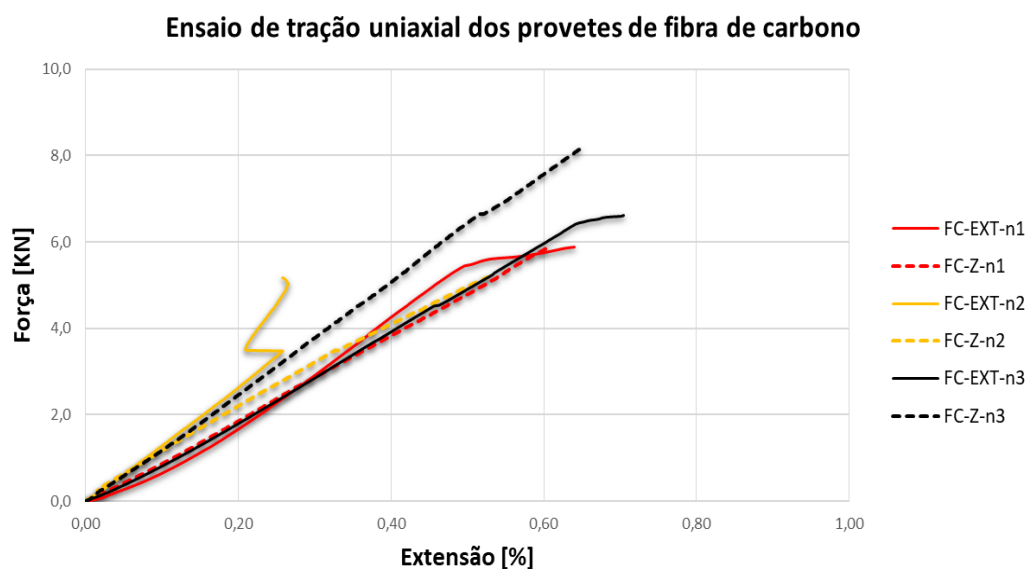


Figura 4.3 - Gráfico força-extensão dos provetes de fibra de carbono sujeitos a tração uniaxial (analisados com extensômetro elétrico e com o extensômetro mecânico da Zwick)

Tabela 4.4 - Resultados obtidos de ambas as campanhas de ensaios à tração dos provetes de fibra de carbono

					média					média					média					
		Fmax	Fmax (3)	Fmax /fio	Fmax /fio	Área	σ <sub>max</sub>	σ <sub>max</sub> (3)	ε <sub>máx</sub>		ε <sub>máx</sub>	F <sub>1</sub> estimado	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub> estimado	F <sub>2</sub>	ε <sub>1</sub>	ε <sub>2</sub>	E	E	
Designação	Nº fios	[N]	[N]	[N]	[N]	[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]	[MPa]	(%)		[%]	<b>0,20</b>	[N]	<b>0,30</b>	[N]	[%]	[%]	[GPa]	[GPa]	
FC1-Z-n1 (1)	1	2585	4622	2585	<b>2475</b>	2,03	1273	2277	0,79	<b>0,69</b>		517,0	513,0	775,5	771,4	0,1	0,2	199	<b>191</b>	
FC1-Z-n2 (1)		2364		2364		2,03	1165		0,59			472,8	472,4	709,3	706,4	0,1	0,2	183		
FC3-Z-n1 (1)	3	11374		3791	<b>3788</b>	6,09	1868		0,85	<b>0,88</b>		2274,8	2265,9	3412,2	3405,9	0,2	0,3	210	<b>192</b>	
FC3-Z-n2 (1)		11145		3715		6,09	1830		0,89			2229,0	2224,5	3343,5	3329,2	0,2	0,3	177		
FC3-Z-n3 (1)		11570		3857		6,09	1900		0,90			2313,9	2308,2	3470,9	3462,2	0,2	0,3	190		
FC3-n1 (1)		5994	8336	1998	<b>2169</b>	6,09	984	1369	0,62	<b>0,60</b>		1198,7	1186,6	1798,1	1795,6	0,1	0,2	163	<b>191</b>	
									0,64			1198,7	1186,6	1798,1	1795,6	0,2	0,2	<b>183</b>		
FC3-n2 (1)		5192		1731		6,09	853		0,53			1038,4	1029,4	1557,6	1552,2	0,1	0,1	173		
									-			1038,4	1029,4	1557,6	1552,2	0,1	0,1	219		
FC3-n3 (1)	8206		2735	<b>2863</b>	6,09	1347		0,65	<b>0,73</b>		1641,3	1628,1	2461,9	2453,2	0,1	0,2	218	<b>191</b>		
								0,71			1641,3	1628,1	2461,9	2453,2	0,2	0,3	<b>171</b>			
					<b>2863</b>						<b>0,73</b>									<b>191</b>

Notas: (1) Extensómetro mecânico da *Zwick*

(2) Extensómetro Elétrico

(3) Valor máximo da força observada na *Zwick* (extensómetro elétrico deixou de registar grandezas antes da rotura do provete)

### 4.1.3. Provetes não reforçados

Com o objetivo de caracterizar as matrizes de cada sistema de reforço executaram-se 5 provetes para cada tipo de argamassa (15 no total) reforçados na zona das garras, por forma a que a rotura ocorresse na zona intermédia dos provetes.

Tal como referido no capítulo anterior, não foi possível ensaiar os provetes da série SI 0 e CRFU 0, pelo que no total foram ensaiados os 5 provetes correspondentes à série Sk-0. Optou-se por apresentar as linhas de tendência dos ensaios realizados (Figura 4.4), pois estes apresentavam, originalmente, pequenas irregularidades de medição.

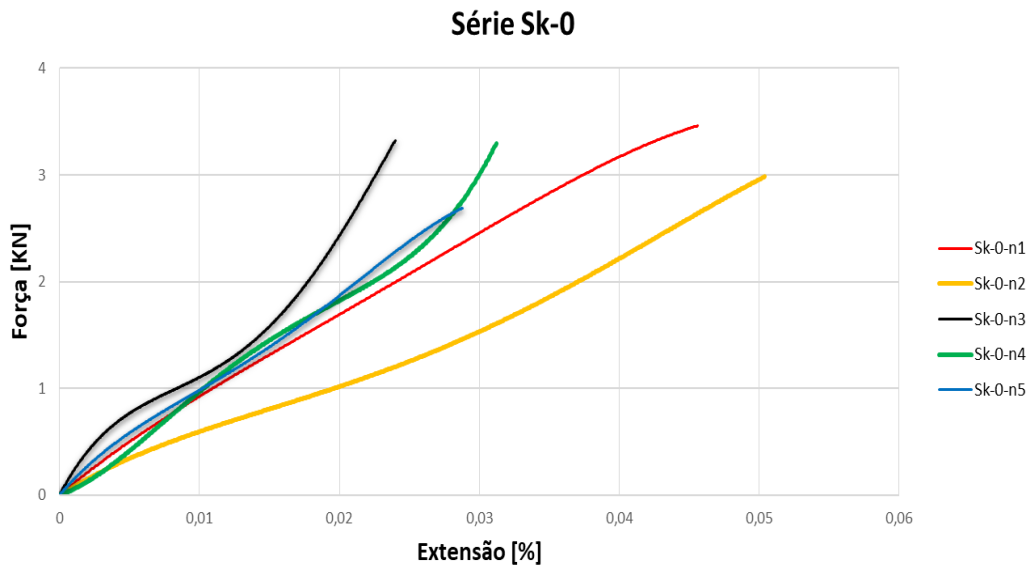


Figura 4.4 – Gráfico Força - Extensão da série Sk 0

Tabela 4.5 – Resultados da série Sk 0

Proвете	$F_{mu}$ [kN]	$\delta_{mu}$ [mm]	$\sigma_{mu}$ [MPa]	$\varepsilon_{mu}$ [%]	$E_{mu}$ [GPa]
Sk - 0 - 1	3,5	0,10	2,6	0,05	9,9
Sk - 0 - 2	2,9	0,10	2,2	0,05	6,8
Sk - 0 - 3	3,2	0,05	2,6	0,02	10,2
Sk - 0 - 4	3,1	0,06	2,8	0,03	9,8
Sk - 0 - 5	2,8	0,06	2,1	0,03	9,8
Média	3,1	0,07	2,5	0,04	9,3

A tensão de rotura da matriz ( $\sigma_{mu}$ ) foi obtida a partir do quociente entre a força última ( $F_m$ ) e a área transversal do provete, que, por sua vez, se obtém a partir do produto entre a largura ( $l_p$ ) e a espessura do provete ( $t_p$ ), ou seja,  $\sigma_{mu} = \frac{F_{mu}}{(l_p * t_p)}$  (ver Tabela 4.5).

Por sua vez, a extensão foi calculada a partir do quociente entre os deslocamentos e o comprimento de medição do LVDT (de 200 mm), isto é,  $\varepsilon_{mu} = \frac{\delta_{mu}}{200}$ , enquanto o módulo de elasticidade foi determinado com base na curva Tensão-Extensão entre 20 e 30% de  $\sigma_{mu}$

Como esperado, os provetes da série Sk-0 apresentaram uma rotura frágil e apenas uma única fenda ao atingirem a rotura (Figura 4.5).

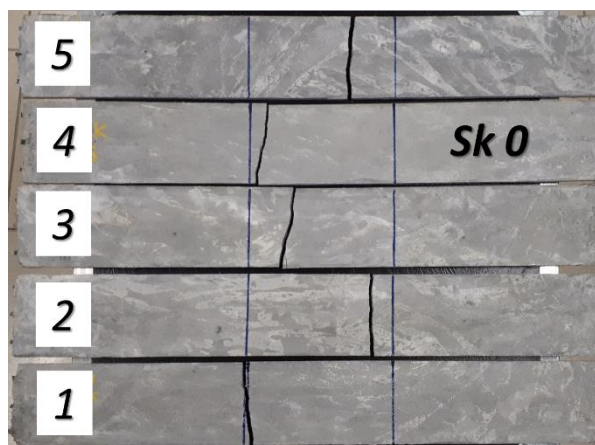


Figura 4.5 - Zona de rotura, padrão e espaçamento de fendas da série Sk 0

## 4.2. Sistema de reforço TRM

Com o objetivo de analisar o efeito do número de camadas de reforço de fibra de carbono e diferentes argamassas como matriz do sistema, foram ensaiados 10 provetes de TRM com argamassa *Sika MonoTop 612* (série Sk 1, com uma camada de reforço e Sk 2, com duas camadas de reforço) e 10 provetes de TRM com argamassa *Secil Reabilita Cal Consolidação* (série Sl 1, com uma camada de reforço e Sl 2, com duas camadas de reforço).

A tensão de rotura ( $\sigma_t$ ) foi obtida a partir do quociente entre a força última ( $F_t$ ) e a área dos  $n$  fios de fibra de carbono ( $2.03 \text{ mm}^2$ ), ou seja,  $\sigma_t = \frac{F_t}{n \cdot 2.03}$ .

A extensão média foi calculada a partir do quociente entre o deslocamento e o comprimento de medição do LVDT (de 200 mm), isto é,  $\varepsilon_t = \frac{\delta_t}{200}$ , enquanto o módulo de elasticidade (correspondente à terceira fase) foi determinado com base na curva Tensão-Extensão entre 20 e 30% de  $\sigma_t$  correspondente à fase 3.

Os resultados obtidos a partir do ensaio à tração uniaxial apresentam-se nos gráficos e tabelas seguintes.

### Série Sk-1

Na Figura 4.6 e na Tabela 4.6 apresentam-se os resultados dos ensaios da série Sk-1, constituída por 1 camada de rede de fibra de carbono e pela matriz *Sika MonoTop 612*. Da análise dos resultados apresentados na Tabela 4.6 constata-se que o valor médio do módulo de elasticidade foi de 201,9 GPa, da tensão na rotura foi de 2015,4 MPa e que a extensão média alcançada na rotura foi de 1,63%.

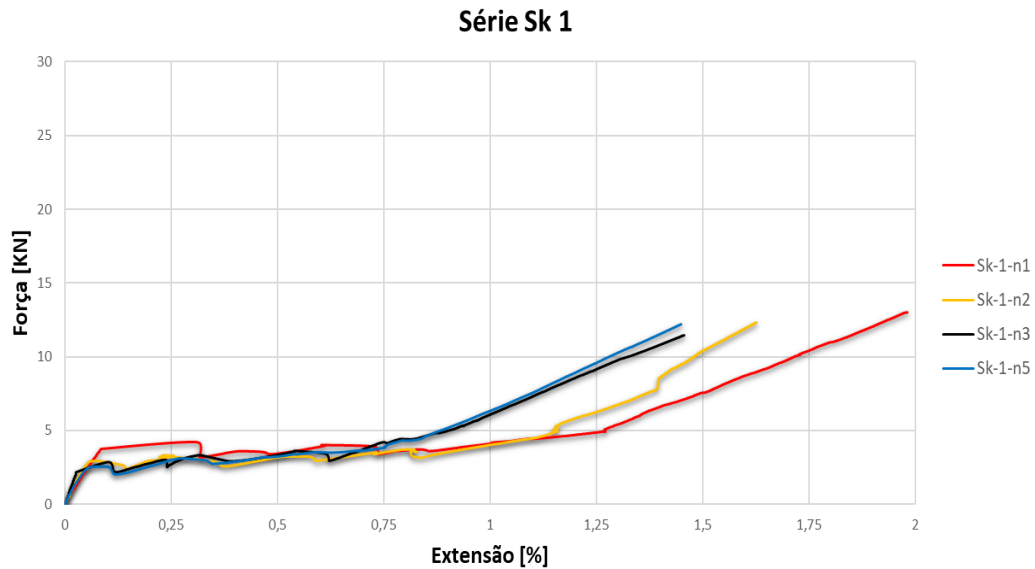


Figura 4.6 - Gráfico Força - Extensão da série Sk - 1

Tabela 4.6 - Resultados da série Sk - 1

Provete	$F_t$ [kN]	$\delta_t$ [mm]	$\sigma_t$ [MPa]	$\varepsilon_t$ [%]	$E_{t\text{ III}}$ [GPa]
Sk - 1 - 1	13,0	3,96	2137,9	1,98	206,0
Sk - 1 - 2	12,3	3,25	2019,9	1,63	175,5
Sk - 1 - 3	11,5	2,91	1890,2	1,46	203,5
Sk - 1 - 5	12,2	2,90	2013,6	1,45	222,4
Média	12,2	3,26	2015,4	1,63	201,9

**Série Sk-2**

Na Figura 4.7 e na Tabela 4.7 apresentam-se os resultados dos ensaios da série Sk-2, constituída por 2 camadas de rede de fibra de carbono e pela matriz *Sika MonoTop 612*. Da análise dos resultados apresentados na Tabela 4.7 constata-se que o valor médio do módulo de elasticidade foi de 238.4 GPa, da tensão na rotura foi de 1987.3 MPa e que a extensão média alcançada na rotura foi de 1.01%.

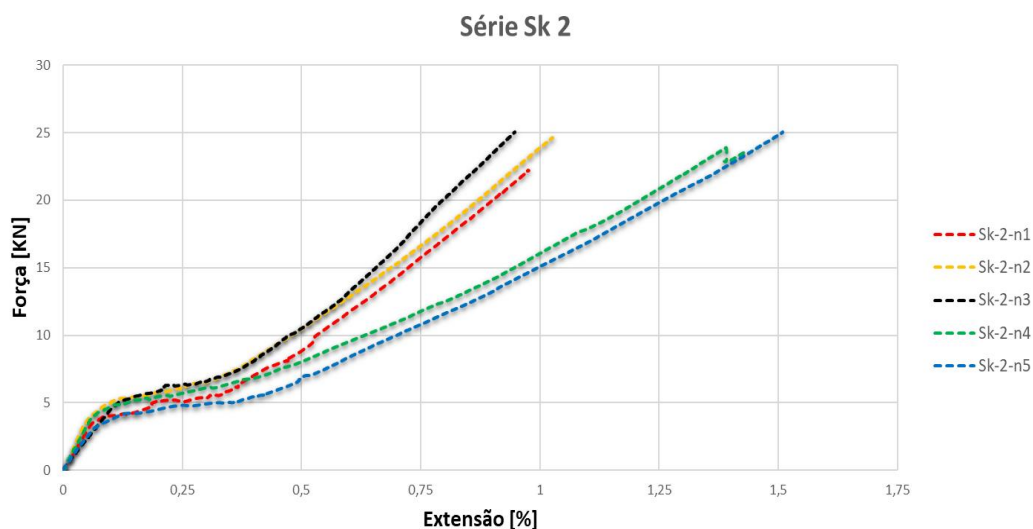


Figura 4.7 – Gráfico Força - Extensão da série Sk - 2

Tabela 4.7 - Resultados da série Sk - 2

Provete	$F_t$ [kN]	$\delta_t$ [mm]	$\sigma_t$ [MPa]	$\varepsilon_t$ [%]	$E_{t\text{ III}}$ [GPa]
Sk - 2 - 1	22,2	2,1	1828,0	1,03	232,0
Sk - 2 - 2	24,6	2,1	2024,5	1,03	219,4
Sk - 2 - 3	25,0	1,9	2058,3	0,95	263,9
Sk - 2 - 4	23,9	2,9*	1964,9	1,45*	143,2*
Sk - 2 - 5	25,1	3,0*	2060,6	1,51*	147,4*
Média	24,2	2,0	1987,3	1,01	238,4

\*valores não considerados para efeitos de média

### Comparação entre as séries Sk-1 e Sk-2

Na Figura 4.8 compara-se o desempenho das séries Sk-1 e Sk-2, com 1 e 2 camadas de CFRP, num diagrama Força-Extensão e na Figura 4.9 mostram-se os padrões de fendas e a zona por onde se deu a rotura de cada provete

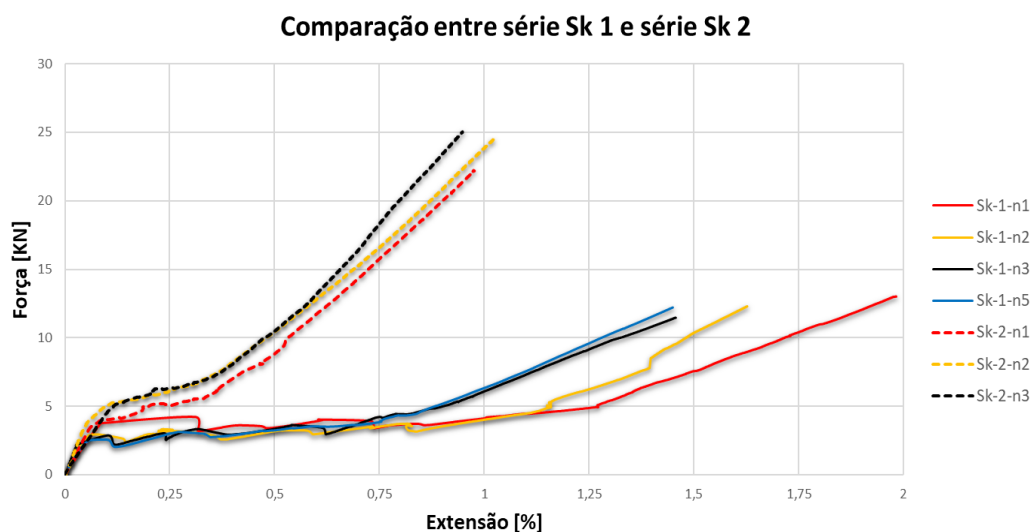


Figura 4.8 - Comparação entre os gráficos Força - Extensão das séries Sk 1 e Sk 2



De acordo com De Santis & Gianmarco [De Santis & Gianmarco, 2014] o modo de rotura, a força última e o módulo de elasticidade da fase 3 é, em geral, condicionado pelas fibras de reforço, mas devido à matriz a extensão final deverá ser inferior comparativamente à extensão obtida a partir dos ensaios realizados apenas à fibra de carbono. Contudo, no caso presente os resultados experimentais realizados, não permitem confirmar esta afirmação, uma vez que a extensão média na rotura da fibra foi de 0,73%, enquanto a extensão média na rotura dos provetes de TRM variou entre 1.63% (uma camada) e 1.01% (duas camadas). Uma possível justificação para esta constatação pode dever-se às fibras não estarem completamente esticadas no interior da matriz, o que originou um aumento da extensão total verificada nos provetes de TRM.

Em ambas as séries todos os provetes apresentaram um modo de rotura frágil, condicionado pelo comportamento elástico linear das fibras de carbono. Para a análise dos resultados não se consideraram os provetes Sk-2-n4 e Sk-2-n5 por apresentarem um comportamento bastante distinto dos restantes provetes da respetiva série. Este comportamento pode, eventualmente, também ser justificado pelo facto de as camadas de fibra utilizada nestes provetes não se encontrarem totalmente esticadas no início do ensaio, o que fez com que a extensão fosse superior e o módulo de elasticidade inferior, mas a tensão de rotura fosse da mesma ordem de grandeza dos restantes provetes, conforme se pode observar nas Tabelas 4.6 e 4.7. Os resultados do provete Sk-1-n4 não foram considerados devido a um erro de leitura dos deslocamentos medidos pelo LVDT.

Analisando os resultados obtidos, verificou-se uma proporcionalidade no aumento de força de rotura e o número de camadas aplicado pois a força de rotura da série Sk 2 (com duas camadas de reforço) foi aproximadamente o dobro da observada na série Sk 1 (com apenas uma camada de reforço). Relativamente aos valores obtidos de extensão e de módulo de elasticidade, a série Sk 1 apresentou um valor médio de extensão superior comparativamente à série Sk 2, mas um valor médio de módulo de elasticidade mais baixo, estes valores podem ser justificados pelo facto durante o processo de execução dos provetes da série Sk 2 ser mais complicado esticar a fibra de carbono em comparação à série Sk 1. A série Sk 1 apresenta uma fase de fendilhação (fase 2) mais longa, este efeito pode ser justificado pelo facto de nesta série os provetes não possuírem armadura mínima de forma a controlar a fendilhação, tal efeito não se verifica na série Sk 2 pois esta já possui uma quantidade de armadura superior à mínima. Consequentemente, o módulo de elasticidade da série Sk 1 foi inferior ao da série Sk 2.

Tal como se pode observar na série Sk 2, o aumento do número de camadas de reforço diminuiu a duração da fase 2 (fase de fendilhação), tendo este efeito sido igualmente observado em outras campanhas experimentais [Cuypers & Wastiels, 2006] e [Larrinaga, 2011].

Na Figura 4.9 podem observar-se os padrões de fendas obtidos nos ensaios das série Sk 1 e Sk 2, bem como a zona de rotura de cada provete. Da análise dos modos de rotura constata-se que nalguns provetes da série Sk 1, a rotura ocorreu na zona intermédia (analísada pelo LVDT), tal não se tendo verificado na série Sk 2, onde a rotura ocorreu sempre no final da zona reforçada próxima das garras de ensaio.

O padrão de fendas é influenciado pelas características e disposição das fibras de carbono e pelo módulo de elasticidade da matriz utilizada. Como a fibra de carbono é relativamente deformável a matriz de origem cimentícia (que possui uma elevada rigidez) apresenta um elevado contributo na rigidez da fase 1 e 2 do compósito [De Santis & Gianmarco, 2014]. Pode-se aferir que visualmente o número e o espaçamento de fendas entre séries são semelhantes, mas como a série Sk 1 não possui uma quantidade mínima de armadura (o que implica o aumento de duração da fase2) as fendas existentes possuem maior abertura comparativamente à série Sk 2. Logo, ao nível de controlo de abertura e distribuição de fendas pode-se concluir que a aplicação de duas camadas de reforço apresenta melhores resultados. Aferiu-se também, visualmente, que ao longo do ensaio, a abertura de fendas da série Sk 1 foi maior comparativamente à serie Sk 2.

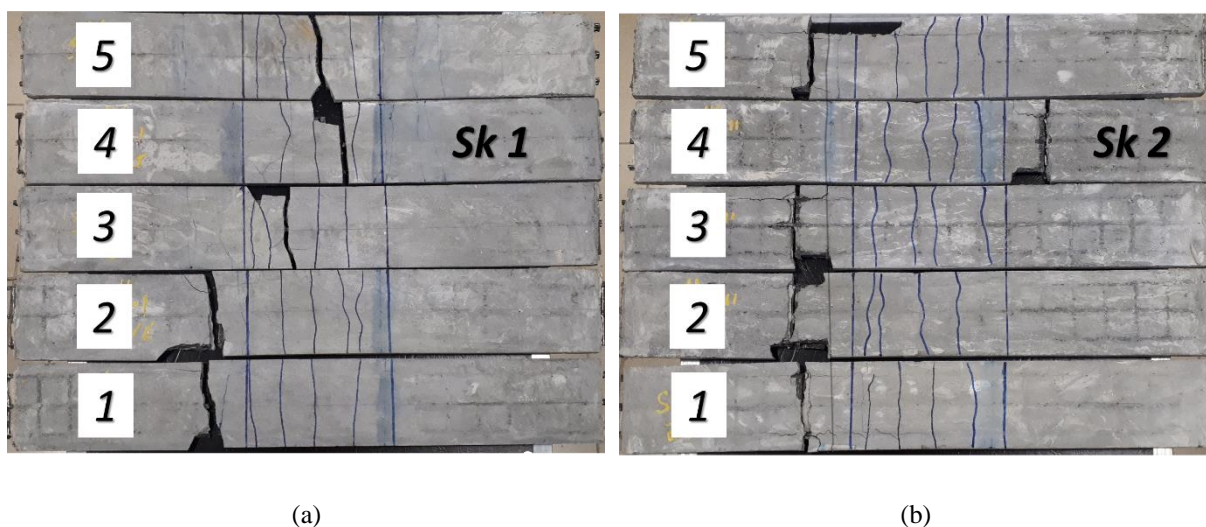


Figura 4.9 – Zona de rotura, padrão e espaçamento de fendas das séries a) Sk 1 e b) Sk 2

**Série SI 1**

Na Figura 4.10 e na Tabela 4.8 apresentam-se os resultados dos ensaios da série SI-1, constituída por 1 camada de rede de fibra de carbono e pela matriz *Secil Reabilita Cal Consolidação*. Da análise dos resultados apresentados na Tabela 4.8 constata-se que o valor médio do módulo de elasticidade foi de 188 GPa, da tensão na rotura foi de 1490.4 MPa e que a extensão média alcançada na rotura foi de 1.27%.

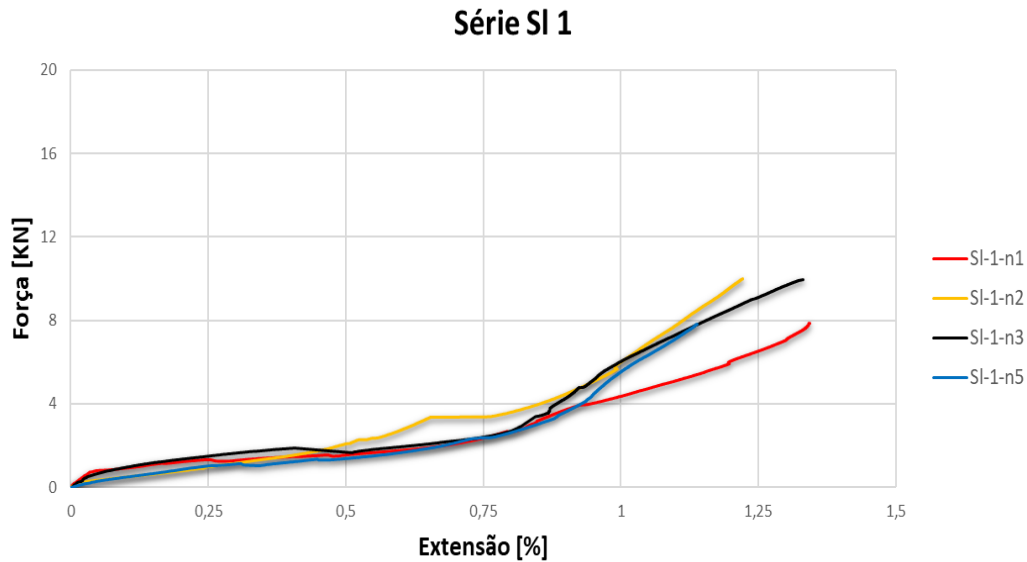


Figura 4.10 - Gráfico Força - Extensão da série SI 1

Tabela 4.8 - Resultados da série SI 1

Provete	$F_t$ [kN]	$\delta_t$ [mm]	$\sigma_t$ [MPa]	$\varepsilon_t$ [%]	$E_{t\text{ III}}$ [GPa]
SI - 1 - 1	8,3	2,69	1359,8	1,34	130,7
SI - 1 - 2	10,0	2,95	1644,6	1,22	181,4
SI - 1 - 3	10,2	2,76	1671,6	1,38	200,4
SI - 1 - 5	7,8	2,28	1285,5	1,14	239,6
Média	9,1	2,67	1490,4	1,27	188,0

**Série SI-2**

Na Figura 4.11 e na Tabela 4.9 apresentam-se os resultados dos ensaios da série SI-2, constituída por 2 camadas de rede de fibra de carbono e pela matriz *Secil Reabilita Cal Consolidação*. Da análise dos resultados apresentados na Tabela 4.9 constata-se que o valor médio do módulo de elasticidade foi de 177.3 GPa, da tensão na rotura foi de 1275.6 MPa e que a extensão média alcançada na rotura foi de 1.08%.

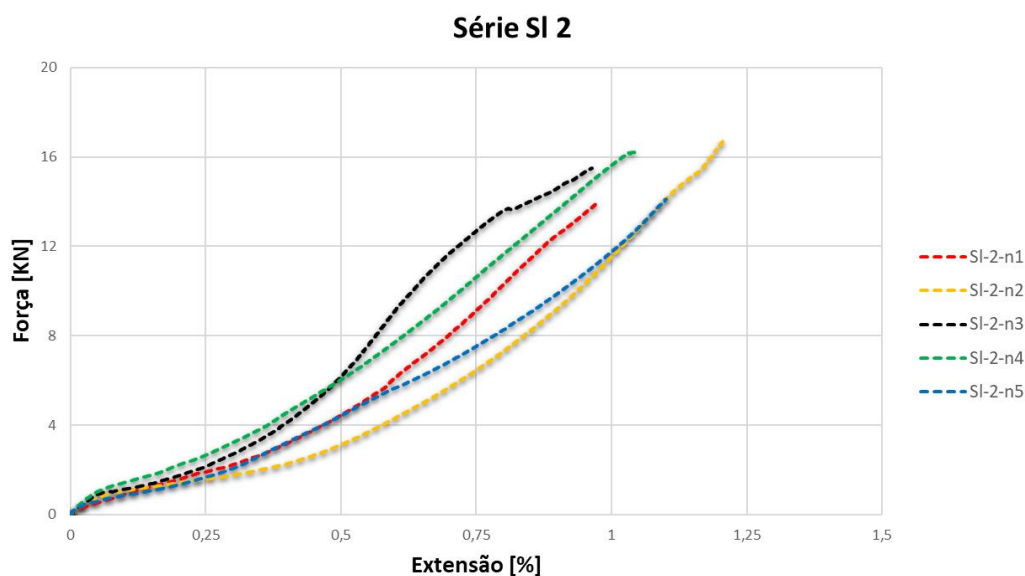


Figura 4.11 - Gráfico Força - Extensão da série SI 2

Tabela 4.9 - Resultados da série SI 2

Provete	$F_t$ [kN]	$\delta_t$ [mm]	$\sigma_t$ [MPa]	$\varepsilon_t$ [%]	$E_{t\text{ III}}$ [GPa]
SI - 2 - 1	14,0	1,95	1149,4	0,98	186,7
SI - 2 - 2	16,7	2,41	1374,3	1,20	200,5
SI - 2 - 3	15,5	1,93	1276,4	0,96	179,0
SI - 2 - 4	17,3	2,29	1416,4	1,14	166,1
SI - 2 - 5	14,1	2,20	1161,4	1,10	154,3
Média	15,5	2,16	1275,6	1,08	177,3

### Comparação entre as séries SI 1 e SI 2

Na Figura 4.12 compara-se o desempenho das séries SI-1 e SI-2, com 1 e 2 camadas de CFRP, num diagrama Força-Extensão e na Figura 4.13 mostram-se os padrões de fendas e a zona por onde se deu a rotura de cada provete.

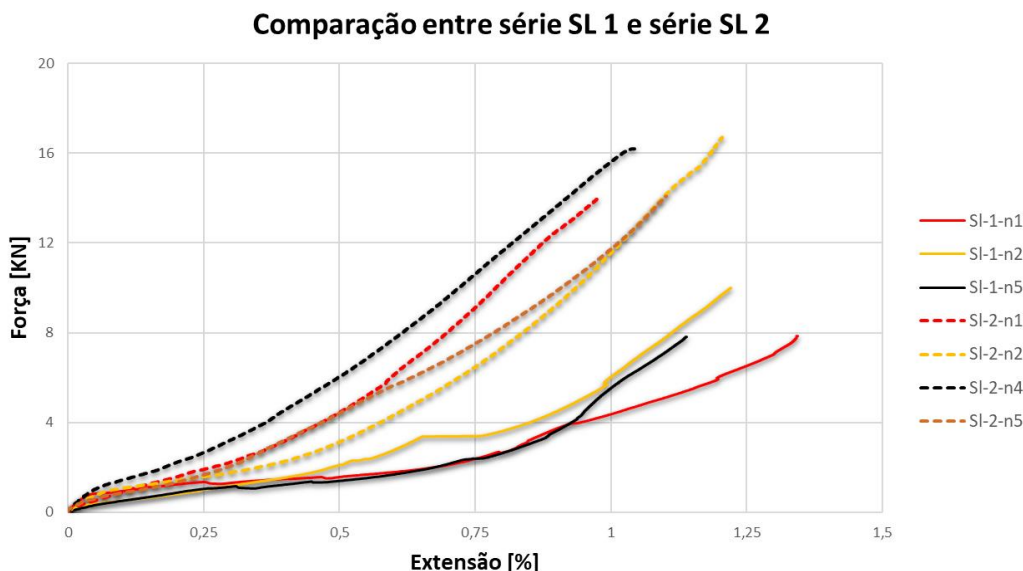
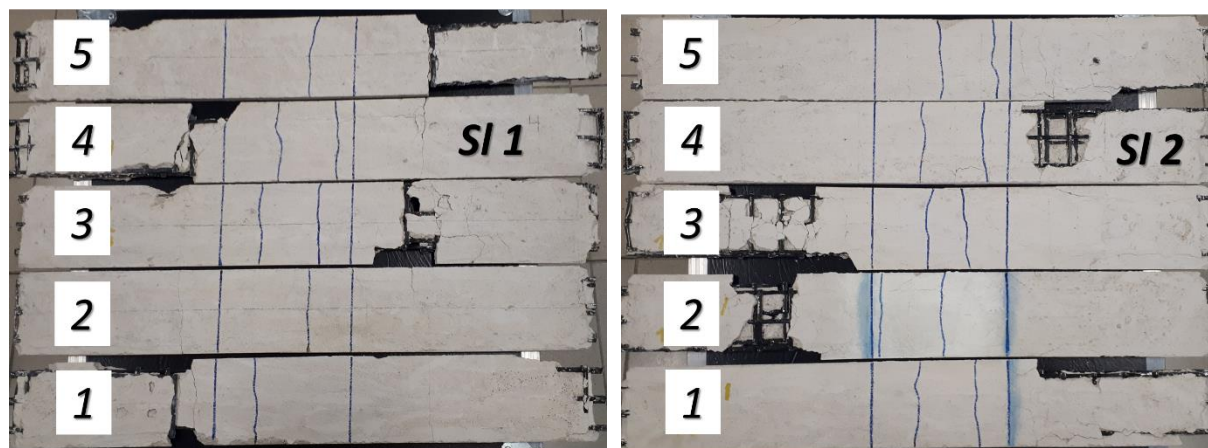


Figura 4.12 – Comparação entre os gráficos Força - Extensão das séries SI 1 e SI 2

Tal como nas séries Sk, todos os provetes das séries SI apresentaram um modo de rotura frágil, pois deu-se uma rotura brusca do compósito devido à rotura das fibras de carbono. Por apresentarem um comportamento bastante distinto dos restantes provetes da série não se consideraram os resultados dos ensaios dos provetes SI 1 e SI 2, pois, em ambos os provetes, possivelmente a fibra de carbono não se encontrava devidamente esticada aquando do ensaio, afetando deste modo o seu comportamento na fase 3. Devido a um erro de leitura dos deslocamentos do LVDT, os resultados do provete SI-1-n4 não foram igualmente considerados.

Analisando os resultados obtidos, a força de rotura da série SI 2 foi superior à suportada pela série SI 1, visto a série SI 2 possuir o dobro da quantidade de armadura comparativamente à série SI 1. Em relação aos valores de extensão e de módulo de elasticidade, a série SI 1 apresentou um valor médio de extensão média e de módulo de elasticidade superior comparativamente à série SI 2. Estes valores podem ser justificados pelo facto de a série SI 1 não possuir armadura mínima de controlo de fendilhação. Logo, a fase 2 foi mais longa nesta série, sendo a fase de fendilhação da série SI 2 quase impercetível (Figura 4.12), pois, tal como foi mencionado, a duração desta fase diminui com o aumento do número de camadas de reforço.

Na Figura 4.13 pode-se observar os provetes ensaiados da série SI, os padrões de fendas e a zona de rotura de cada provete. Em ambas as séries, a rotura ocorreu sempre no final da zona reforçada devido às tensões originadas pelo aperto das garras de ensaio. Tal como sucedeu nas séries Sk, o número e o espaçamento de fendas são semelhantes. Porém, visualmente, observou-se ao longo do ensaio que a abertura de fendas da série SI 1 foi maior comparativamente à série SI 2.



(a) (b)

Figura 4.13 - Zona de rotura, padrão e espaçamento de fendas das séries a) SI 1 e b) SI 2



### Comparação entre as séries Sk 1 e SI 2

Na Figura 4.14 compara-se o desempenho das séries Sk-1 e SI-1, com 1 camada de CFRP mas executadas com matrizes distintas, num diagrama Força-Extensão e na Figura 4.15 mostram-se os padrões de fendas e a zona por onde se deu a rotura de cada provete.

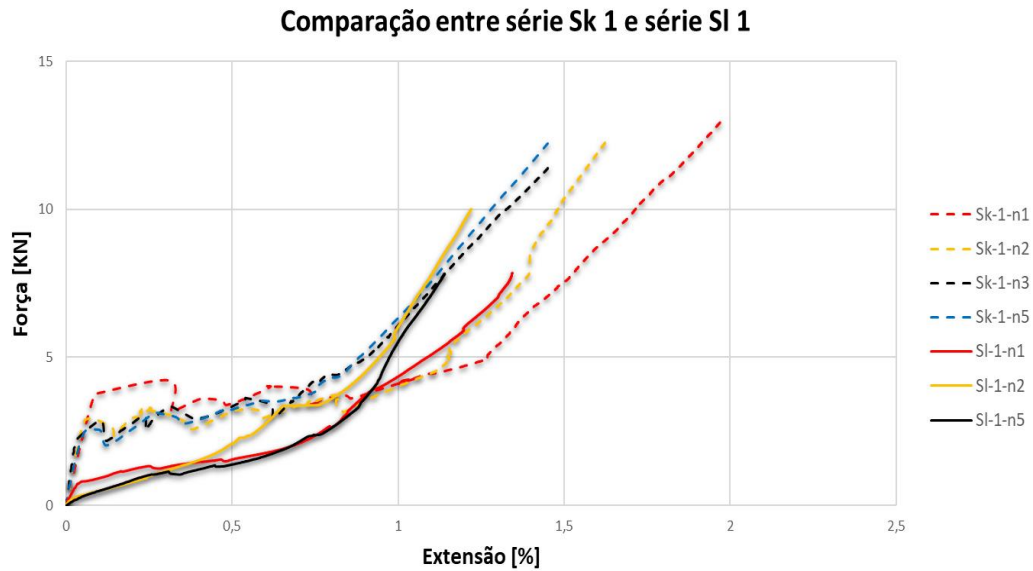


Figura 4.14 - Comparação entre os gráficos Força - Extensão das séries Sk 1 e SI 1

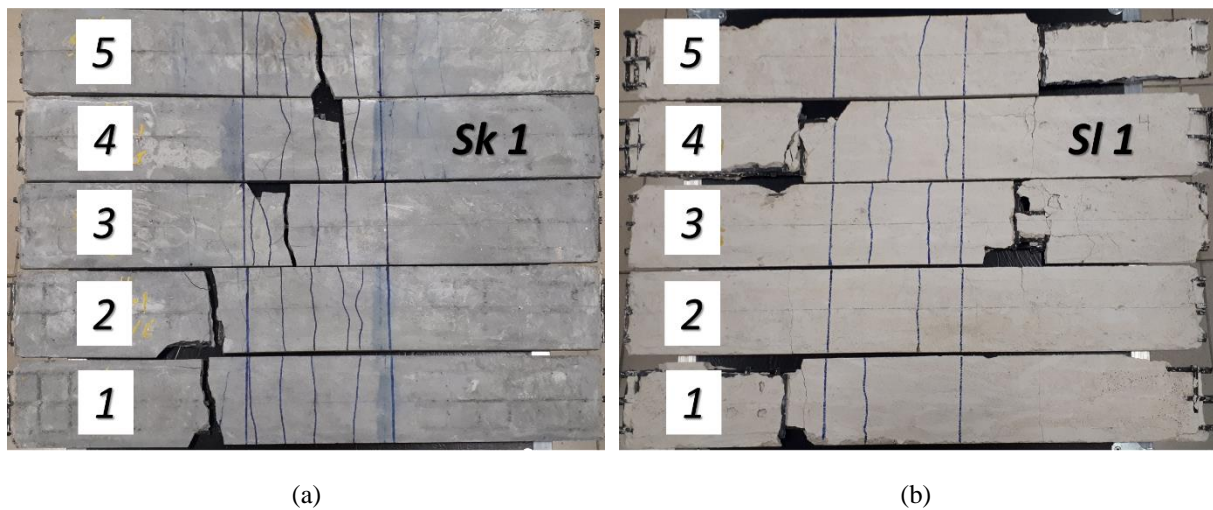


Figura 4.15 - Zona de rotura, padrão e espaçamento de fendas das séries a) Sk 1 e b) SI 1

### Comparação entre as séries Sk 2 e SI 2

Na Figura 4.16 compara-se o desempenho das séries Sk-2 e SI-2, com 2 camadas de CFRP mas executadas com matrizes distintas, num diagrama Força-Extensão e na Figura 4.17 mostram-se os padrões de fendas e a zona por onde se deu a rotura de cada provete.

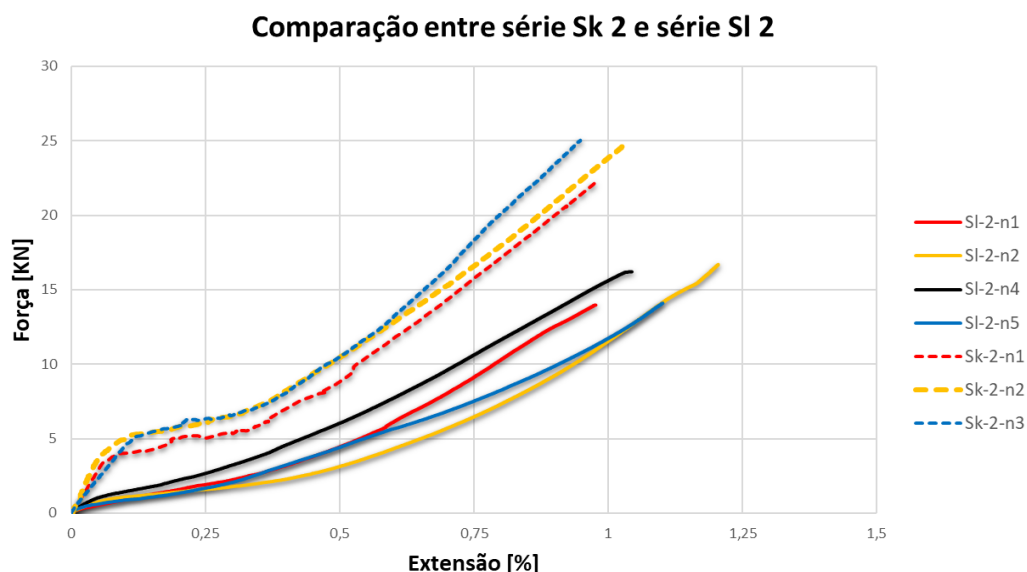


Figura 4.16 - Comparação entre os gráficos Força - Extensão das séries Sk 2 e SI 2

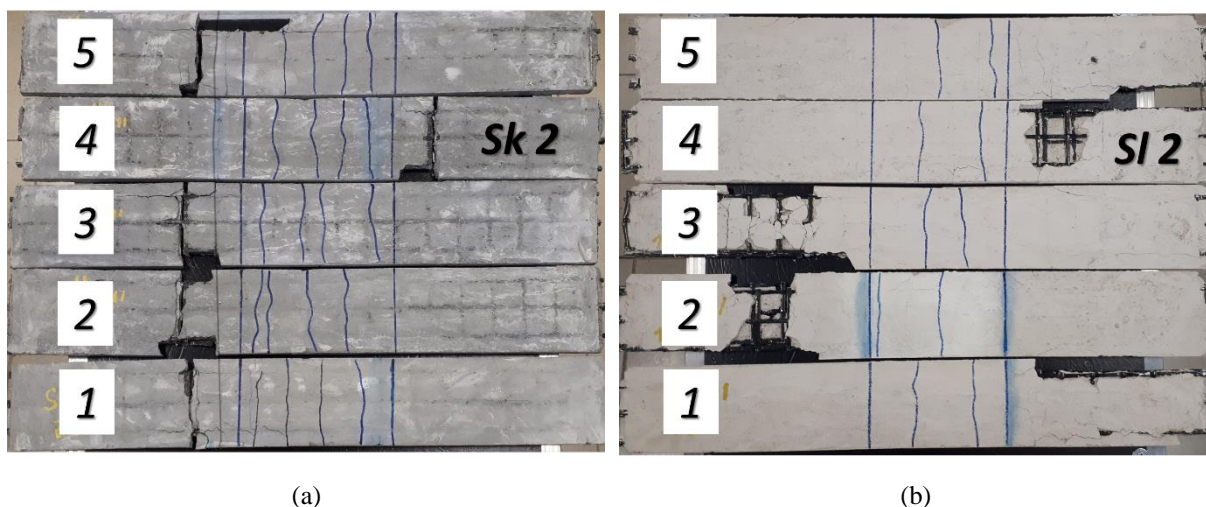


Figura 4.17 - Zona de rotura, padrão e espaçamento de fendas das séries Sk 2 e SI 2

Através dos gráficos e tabelas anteriores, e a partir das Figuras 4.15 e 4.17, é possível analisar o efeito da aplicação de diferentes matrizes ao sistema de TRM. Constatando-se que os provetes executados com argamassa *Sika MonoTop 612* (de origem cimentícia) apresentam uma maior resistência à tração e rigidez comparativamente aos provetes executados com argamassa *Secil Reabilita Cal Consolidação* (cal hidráulica natural). Pois a argamassa *Sika MonoTop 612* devido à sua rigidez apresenta um contributo considerável na rigidez das fases 1 e 2 das séries Sk. Por sua vez, a argamassa *Secil Reabilita Cal Consolidação* devido à sua baixa rigidez possui uma contribuição praticamente negligenciável na influência da rigidez das fases 1 e 2 dos provetes da série SI.

A partir das Figuras 4.15 e 4.17, verifica-se visualmente que o número de fendas das séries Sk é superior ao número das séries Sl e que o espaçamento entre fendas é maior nas séries Sl. Estes resultados podem ser justificados pelo facto de a matriz de origem cimentícia apresentar uma resistência e rigidez muito superior comparativamente à matriz de cal hidráulica natural (ver Tabelas 3.3 e 3.4), o que permite um melhor controlo e distribuição de fendas.

### 4.3. Sistema de reforço CRFU

Com o objetivo de analisar a influência da quantidade de fibras de aço na eficácia do sistema de reforço, ensaiaram-se, no total, 18 provetes (6 por série), tendo-se variado a percentagem de fibra entre os 0% e 3% (séries CRFU 1%, CRFU 2% e CRFU 3%).

A tensão de rotura foi determinada em relação à quantidade de fibra de aço presente nos provetes. Para tal, dividiu-se a força última pela área transversal de fibra incorporada no compósito, ou

$$\text{seja, } \sigma_t = \frac{F_t}{(l_{comp} * t_{comp}) * (0.01 \text{ ou } 0.02 \text{ ou } 0.03)}$$

A extensão foi calculada a partir do quociente entre os deslocamentos e o comprimento de medição do LVDT (de 200 mm), ou seja,  $\varepsilon_t = \frac{\delta_t}{200}$ , enquanto o módulo de elasticidade (obtido em relação à área transversal do compósito) foi determinado com base na curva Tensão-Extensão entre 40 e 50% de  $\sigma_t$

Os resultados obtidos a partir do ensaio à tração uniaxial apresentam-se nos gráficos e tabelas seguintes.

**Série CRFU 1%**

Na Figura 4.18 e na Tabela 4.10 apresentam-se os resultados dos ensaios da série CRFU 1%, constituída por 1% de fibra de aço e pela Calda Cimentícia como matriz. Da análise dos resultados apresentados na Tabela 4.10 constata-se que o valor médio do módulo de elasticidade foi de 5 GPa, da tensão na rotura foi de 334,8 MPa e que a extensão média alcançada na rotura foi de 0,08%.

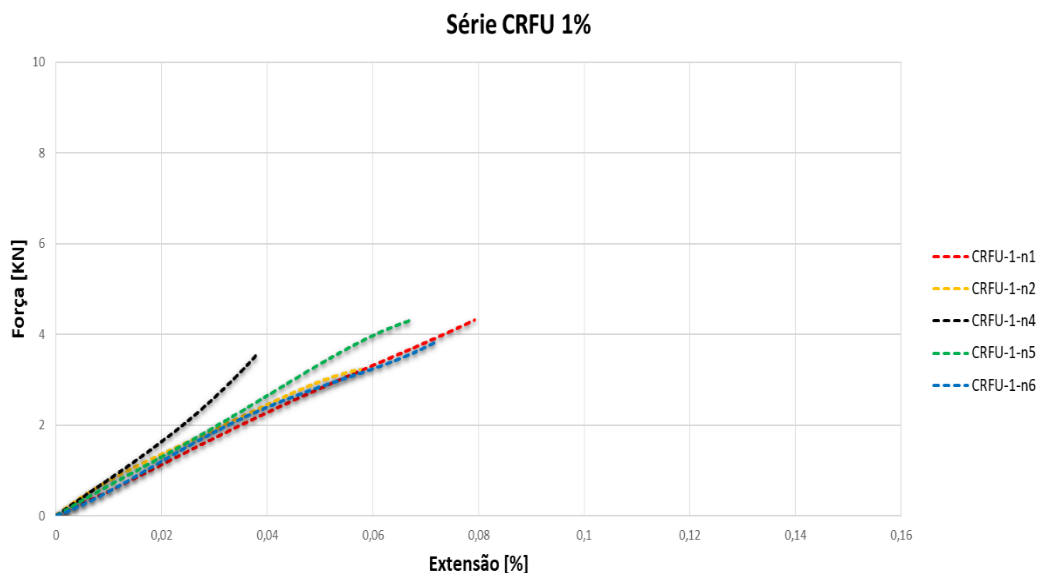


Figura 4.18 – Gráfico Força - Extensão da série CRFU 1%

Tabela 4.10 – Resultados experimentais da série CRFU 1%

Provete	$F_t$ [kN]	$\delta_t$ [mm]	$\sigma_t$ [MPa]	$\varepsilon_t$ [%]	$E_t$ [GPa]
CRFU-1-n1	4,2	0,15	365,3	0,08	5,2
CRFU-1-n2	3,2	0,18	304,2	0,10	5,7
CRFU-1-n4	3,7	0,27*	331,9	0,14*	7,9*
CRFU-1-n5	4,3	0,14	349,4	0,07	5,0
CRFU-1-n6	4,0	0,14	323,4	0,07	4,1
Média	3,9	0,15	334,8	0,08	5,0

\*valores não considerados para efeitos de média

**Série CRFU 2%**

Na Figura 4.19 e na Tabela 4.11 apresentam-se os resultados dos ensaios da série CRFU 2%, constituída por 2% de fibra de aço e pela Calda Cimentícia como matriz. Da análise dos resultados apresentados na Tabela 4.11 constata-se que o valor médio do módulo de elasticidade foi de 4.8 GPa, da tensão na rotura foi de 350.2 MPa e que a média da extensão média alcançada na rotura foi de 0.13%.

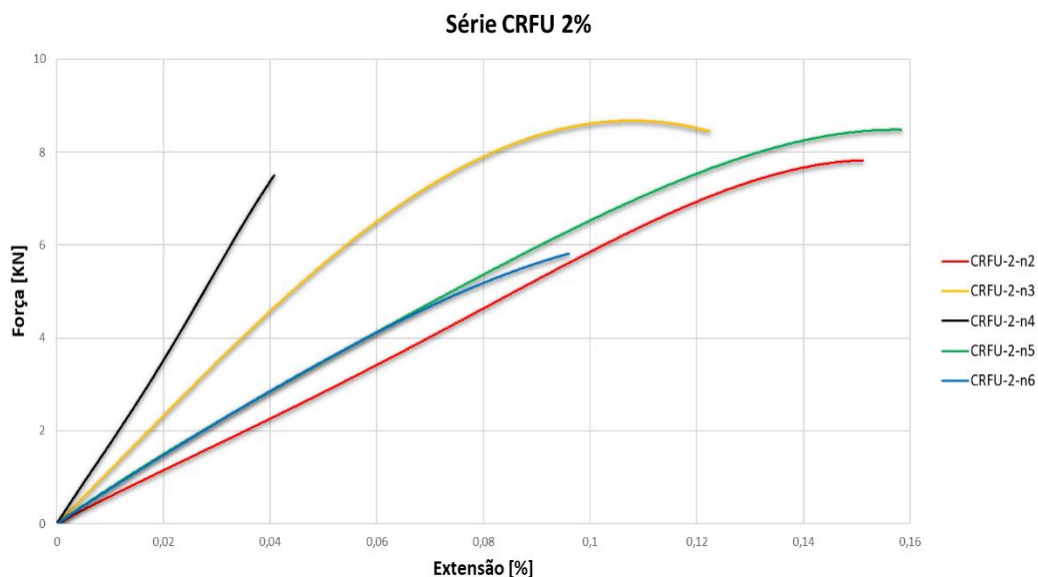


Figura 4.19 – Gráfico Força - Extensão da série CRFU 2%

Tabela 4.11 – Resultados experimentais da série CRFU 2%

Provete	$F_t$ [kN]	$\delta_t$ [mm]	$\sigma_t$ [MPa]	$\varepsilon_t$ [%]	$E_t$ [GPa]
CRFU-2-n2	7,9	0,30	347,2	0,15	4,8
CRFU-2-n3	8,7	0,24	353,5	0,12	8,2*
CRFU-2-n4	8,8	0,08*	355,6	0,04*	11,1*
CRFU-2-n5	8,5	0,32	344,4	0,16	5,2
CRFU-2-n6	5,8	0,19	215,0	0,10	4,5
Média	8,5	0,26	350,2	0,13	4,8

\*valores não considerados para efeitos de média

**Série CRFU 3%**

Na Figura 4.20 e na Tabela 4.12 apresentam-se os resultados dos ensaios da série CRFU 3%, constituída por 3% de fibra de aço e pela Calda Cimentícia como matriz. Da análise dos resultados apresentados na Tabela 4.12 constata-se que o valor médio do módulo de elasticidade foi de 6.7 GPa, da tensão na rotura foi de 227.9 MPa e que a extensão média alcançada na rotura foi de 0.12%.

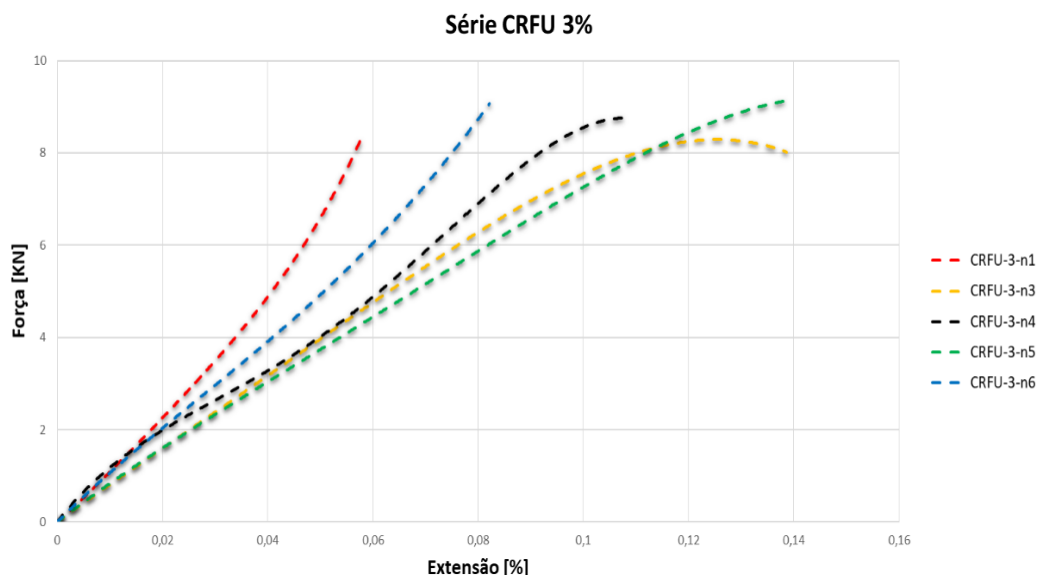


Figura 4.20 – Gráfico Força - Extensão da série CRFU 3%

Tabela 4.12 - Resultados experimentais da série CRFU 3%

Provete	$F_t$ [kN]	$\delta_t$ [mm]	$\sigma_t$ [MPa]	$\varepsilon_t$ [%]	$E_t$ [GPa]
CRFU-3-n1	8,1	0,12	220,3	0,05*	11,5*
CRFU-3-n3	8,3	0,28	227,3	0,14	6,5
CRFU-3-n4	8,8	0,11	218,1	0,11	7,2
CRFU-3-n5	9,1	0,28	246,2	0,14	5,8
CRFU-3-n6	9,2	0,16	227,8	0,08	7,2
Média	8,7	0,19	227,9	0,12	6,7

\*valores não considerados para efeitos de média

**Comparação entre as diversas séries (CRFU 1%, CRFU 2% e CRFU 3%)**

Nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 compara-se o desempenho das séries CRFU 1%, CRFU 2% e CRFU 3%, executadas com Calda Cimentícia e 1%, 2% e 3% de fibra de aço respetivamente, num diagrama Força-Extensão e na Figura 4.24 mostram-se os padrões de fendas e a zona por onde se deu a rotura de cada provete.



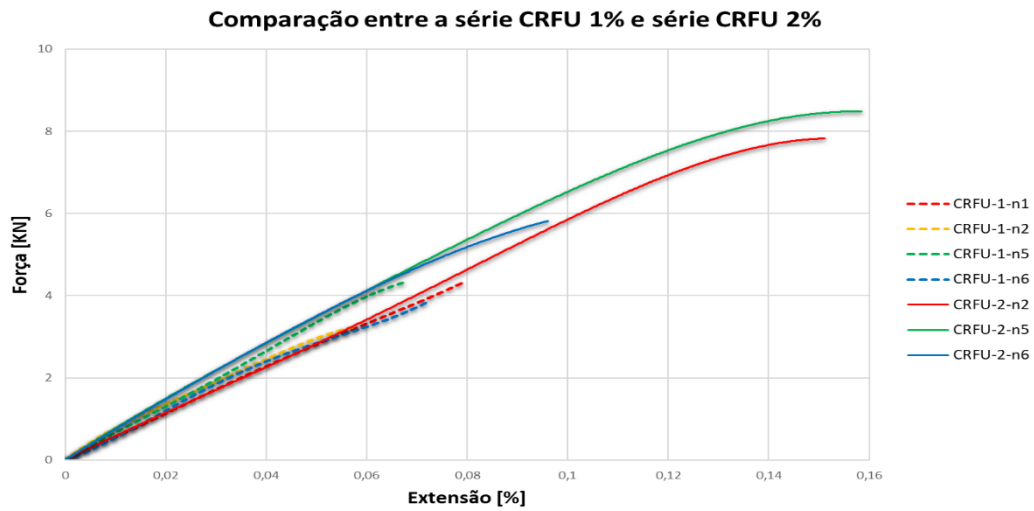


Figura 4.21 - Comparação entre os gráficos Força - Extensão das séries CRFU 1% e CRFU 2%

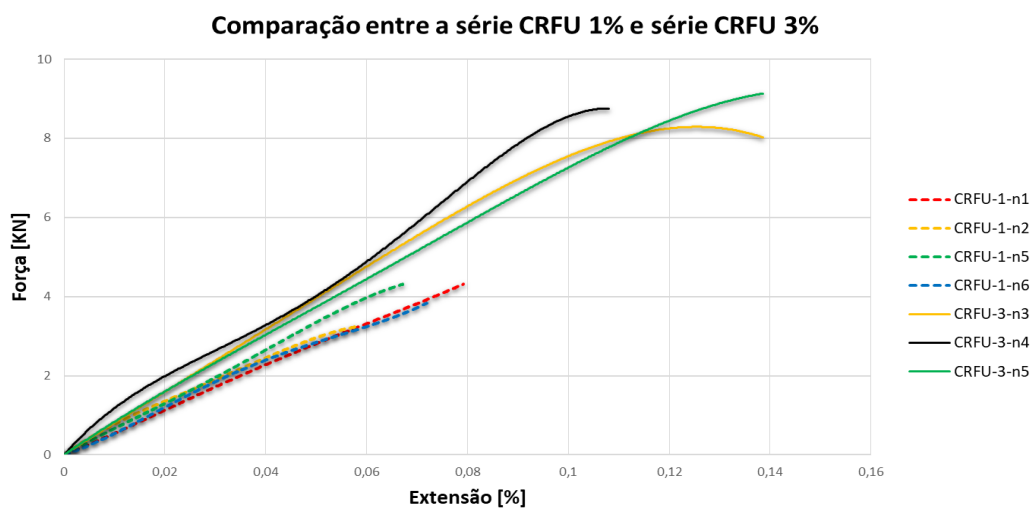


Figura 4.22 - Comparação entre os gráficos Força - Extensão das séries CRFU 1% e CRFU 3%

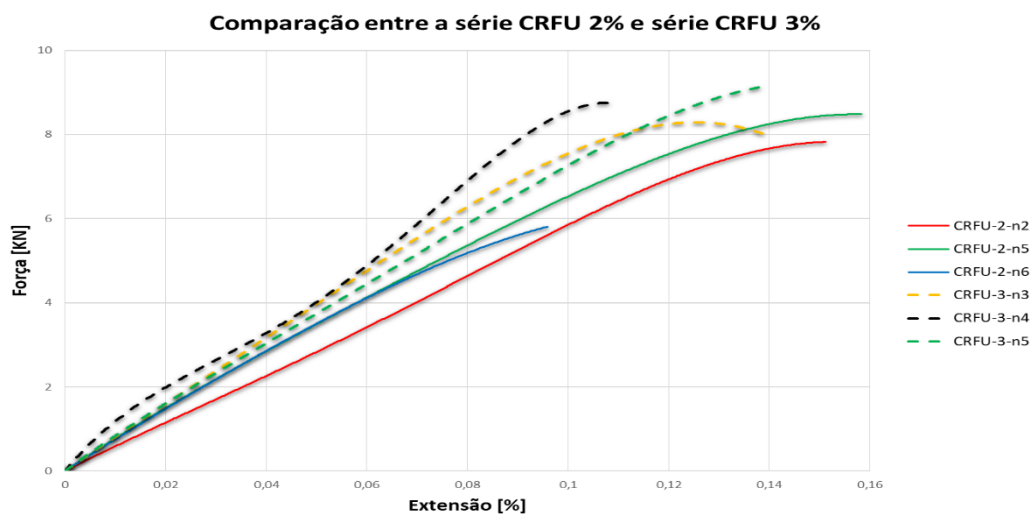


Figura 4.23 - Comparação entre os gráficos Força - Extensão das séries CRFU 2% e CRFU 3%

A partir dos ensaios realizados e dos resultados obtidos, verificou-se que, tal como ocorreu nos provetes de TRM, todos os provetes de CRFU apresentaram um modo de rotura frágil independentemente da quantidade de percentagem de fibra de aço. As fibras romperam provocando a rotura do compósito.

Observou-se que os provetes CRFU-1-n4, CRFU-2-n3, CRFU-2-n4, CRFU-3-n1 e CRFU-3-n6 apresentavam uma ligeira deformação, antes de serem ensaiados. Logo, estes possuíram uma menor rigidez inicial comparativamente aos restantes provetes das respetivas séries, afetando assim a sua relação tensão-extensão. Por esse motivo, e de forma a permitir uma melhor análise das diferenças entre as diversas séries, estes não foram contabilizados. Por sua vez, os resultados dos provetes CRFU-1-n3, CRFU-2-n1 e CRFU-3-n2 não foram considerados devido a um erro de leitura dos deslocamentos do LVDT.

Analisando os resultados obtidos, a força de rotura da série CRFU 1% foi aproximadamente metade da suportada pelas séries CRFU 2% e CRFU 3%, que apresentaram valores muito semelhantes entre si. Em termos de tensão à tração, a série CRFU 2% foi a que apresentou melhores resultados, ao contrário da série CRFU 3%, que, inclusive, apresentou uma resistência menor comparativamente à série CRFU 1%. Estes resultados podem ser justificados pelo facto de o processo de execução dos provetes de CRFU 3% ser mais complexo comparativamente às outras séries devido à elevada percentagem de fibra de aço utilizada. Logo, o número de vazios presentes nos provetes desta série é superior comparativamente às restantes, o que afeta a tensão suportada pelos mesmos, pois a tensão/resistência à tração depende da área transversal que, em relação aos provetes de CRFU, é superior à área transversal real, consequentemente a capacidade de resistência à tração é afetada. Machado (2013) aferiu também que em termos de resistência à tração os provetes executados com 2% de fibra apresentaram melhores resultados comparativamente aos com 3% de volume de fibra de aço.

Em relação aos valores de extensão, as séries CRFU 2% e CRFU 3% apresentaram valores médios de extensão semelhantes, superiores à série CRFU 1%. Relativamente ao módulo de elasticidade, este foi relacionado com a área transversal do compósito e foi determinado com base na curva Tensão-Extensão entre 40 e 50% de  $\sigma_t$

Note-se que os provetes das diversas séries apresentam um andamento semelhante de força-extensão, apesar de, que neste tipo de compósito, não ser possível fazer a distinção das diversas fases descritas anteriormente, tal como ocorria nos sistemas de TRM. Como as fibras de aço utilizadas apresentam esbelteza infinita a abertura de fendas que se formam ao longo do ensaio são praticamente indetetáveis, sendo apenas visível uma única fenda aquando da rotura do provete.

Na Figura 4.24 é possível observar os provetes ensaiados, os padrões de fendas e a zona de rotura de cada provete das várias séries de CRFU. Em todas as séries, três dos provetes atingiram a rotura na zona intermédia analisada pelo LVDT. Todos os provetes apresentaram uma única fenda aquando da sua rotura, esta característica pode ser justificada pela elevada rigidez do compósito, pela esbelteza das fibras e pelo facto de não existir escorregamento suficiente das fibras de aço. Logo, estas partem imediatamente ao atingem a rotura.

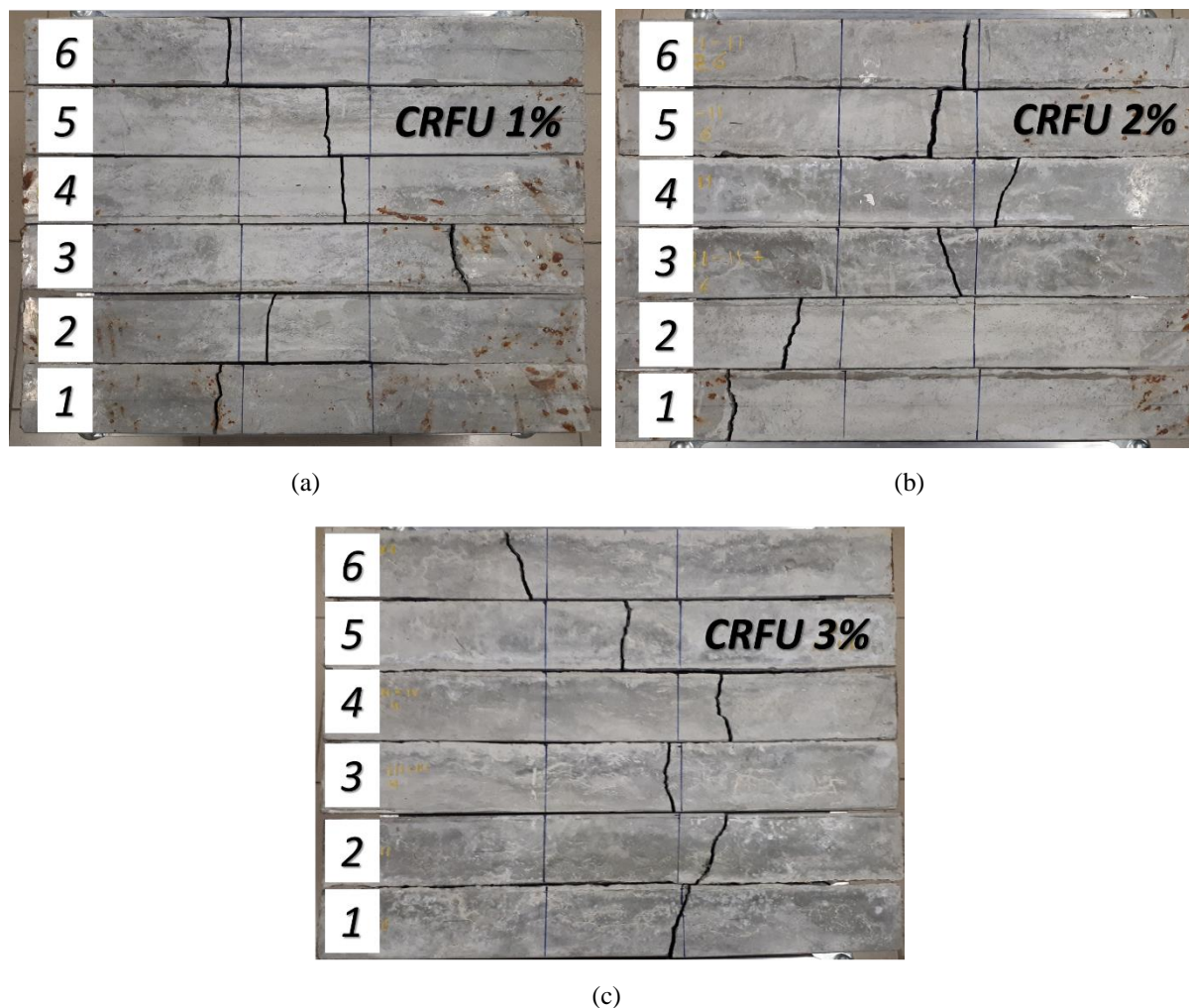


Figura 4.24 - Zona de rotura, padrão e espaçamento de fendas das séries a) CRFU 1%, b) CRFU 2% e c) CRFU 3%

#### 4.4. Análise do campo de deslocamentos

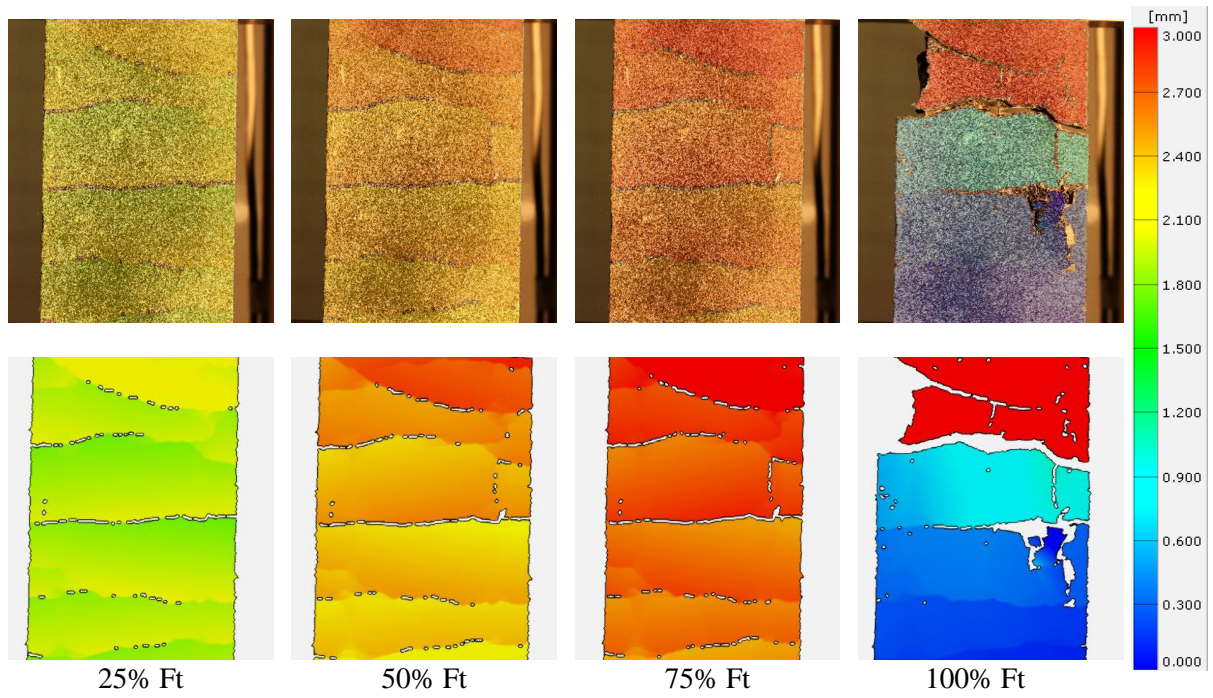
Neste subcapítulo analisa-se o campo de deslocamentos obtido em cada ensaio, a partir da utilização do software *GOM Correlate*. Com o apoio do software, foi possível analisar a abertura de fendas de cada provete. Contudo, não foi possível alcançar o objetivo de obter os deslocamentos relativos a partir do programa, dado que estes apresentaram algum ruído na medição. Os resultados obtidos para os deslocamentos ao longo do comprimento de medição (de 140 mm) apresentaram alguns erros devido ao aparecimento das fendas, não sendo por isso possível comparar os diagramas força-deslocamento obtidos experimentalmente através do LVDT e do software *GOM Correlate*.

Apresentam-se em seguida os resultados obtidos para apenas um provete de cada série de TRM e CRFU. Os restantes podem ser visualizados nos apêndices finais incluídos na dissertação (séries Sk e Sl no apêndice A e séries CRFU no apêndice B). Note-se que o software *GOM Correlate* apenas permite retirar informação sobre o que se passa na superfície exterior da matriz, não existindo por isso medições diretamente ao nível do que se passa nas fibras. A abertura de fendas dos provetes foi analisada através do software *GOM Correlate*. Para tal, após a aquisição de dados do ensaio, selecionaram-se dois pontos em lados opostos da fenda de modo a que os pixéis em torno do ponto de faceta não intercessem a fenda, por forma a não afetar a leitura do DIC (Digital Image Correlation). Note-se que a matriz encontra-se praticamente indeformada na periferia da zona limite da fenda, pelo que os deslocamentos relativos dos pontos de faceta correspondem à abertura da fenda.

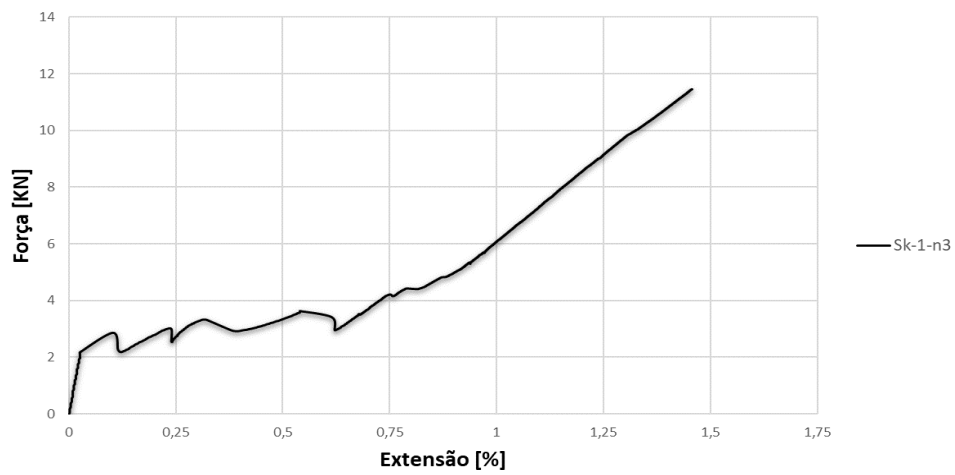
O estudo da abertura, localização e distancia das fendas é importante pois estas podem afetar a durabilidade dos sistemas de reforço. As fendas expõem as fibras de reforço às agressões do meio exterior e influenciam a capacidade de transferência de carga ao longo da interface fibra-matriz. A partir do contorno do padrão do campo de deslocamentos é possível observar um aumento dos deslocamentos na zona onde irá surgir uma fenda, mesmo antes de esta ser visível a olho nu [Tekieli et al, 2016].

Seguidamente, apresentam-se os campos de deslocamentos, os diagramas força-extensão obtidos com o apoio do LVDT e os diagramas abertura de fendas-extensão obtidos para um provete de cada uma das séries (Sk-1, Sk-2, Sl-1, Sl-2, CFRU-1, CFRU-2 e CFRU-3). Realça-se que as imagens correspondentes ao campo de deslocamento foram obtidas para 25%, 50%, 75% e 100% da força última aplicada.

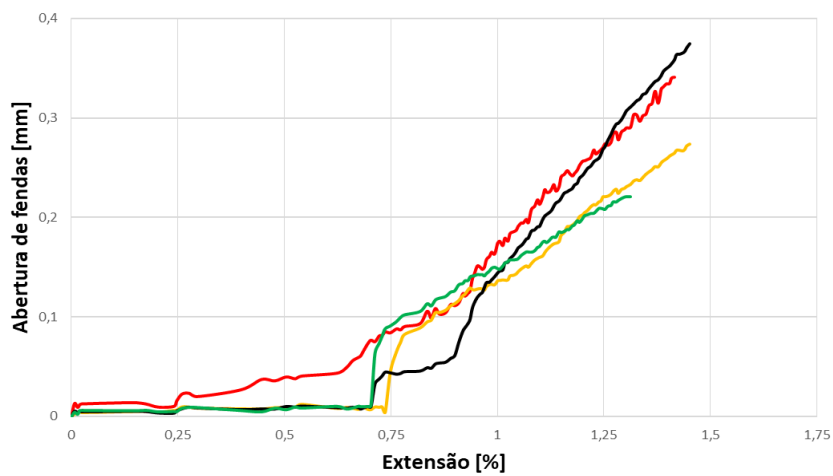
**Provet Sk-1-n3**



(a)



(b)

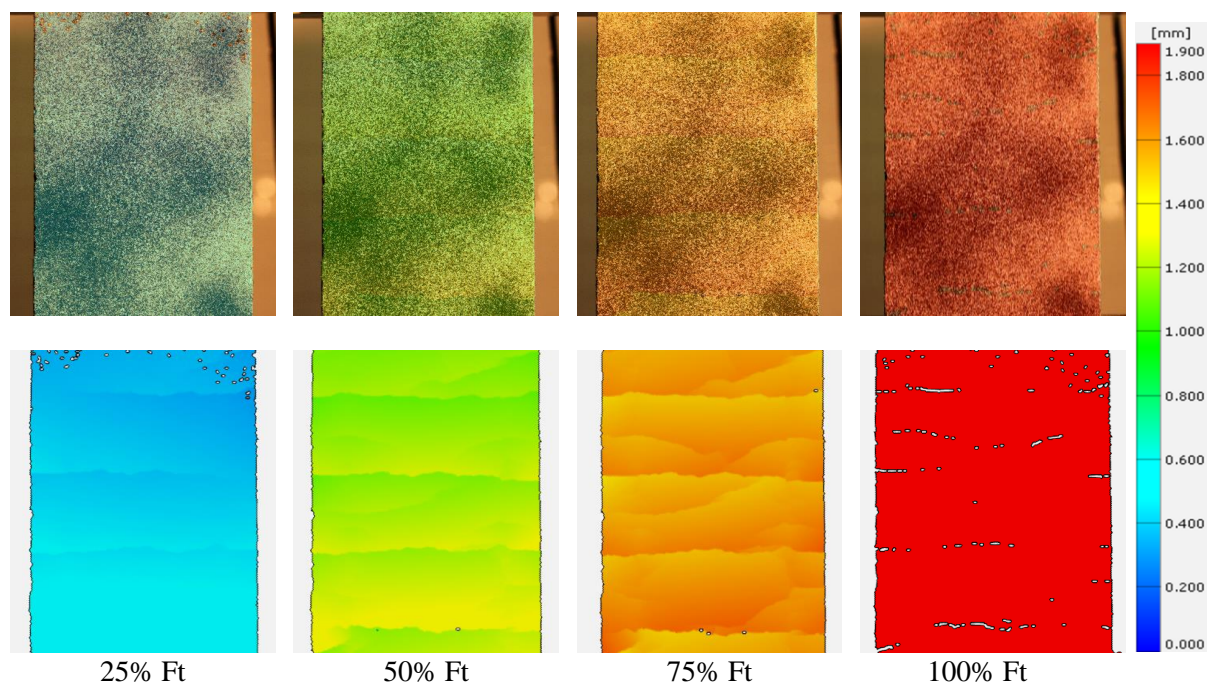


(c)

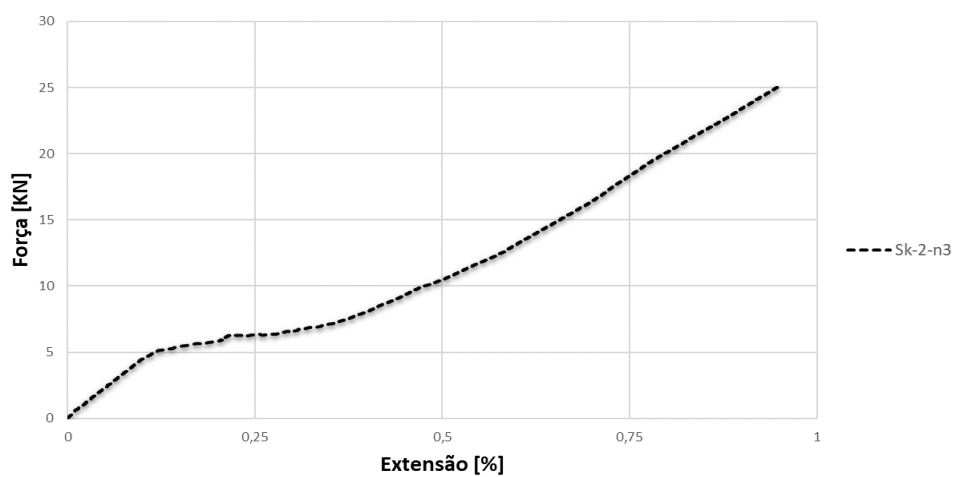
Figura 4.25 – (a) Campo de deslocamentos, (b) força-extensão e (c) abertura de fendas - provete Sk-1-n3



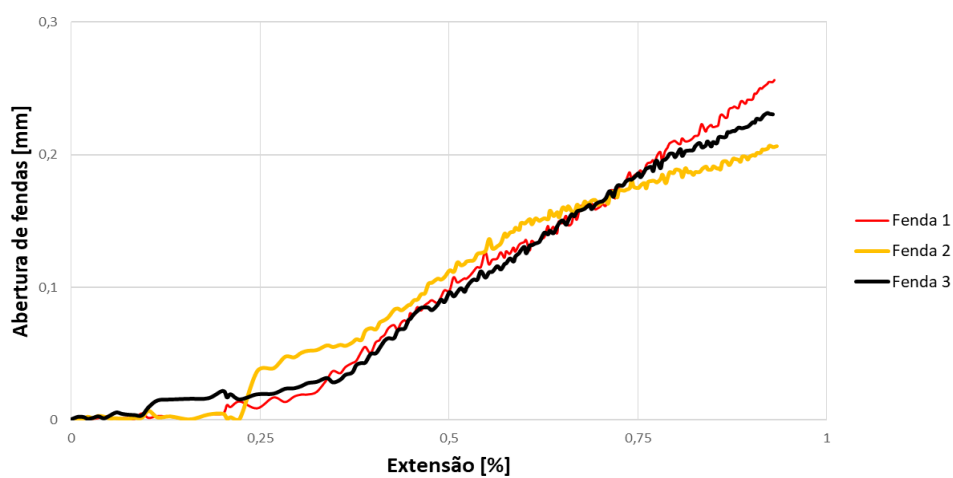
### Provete Sk-2-n3



(a)



(b)

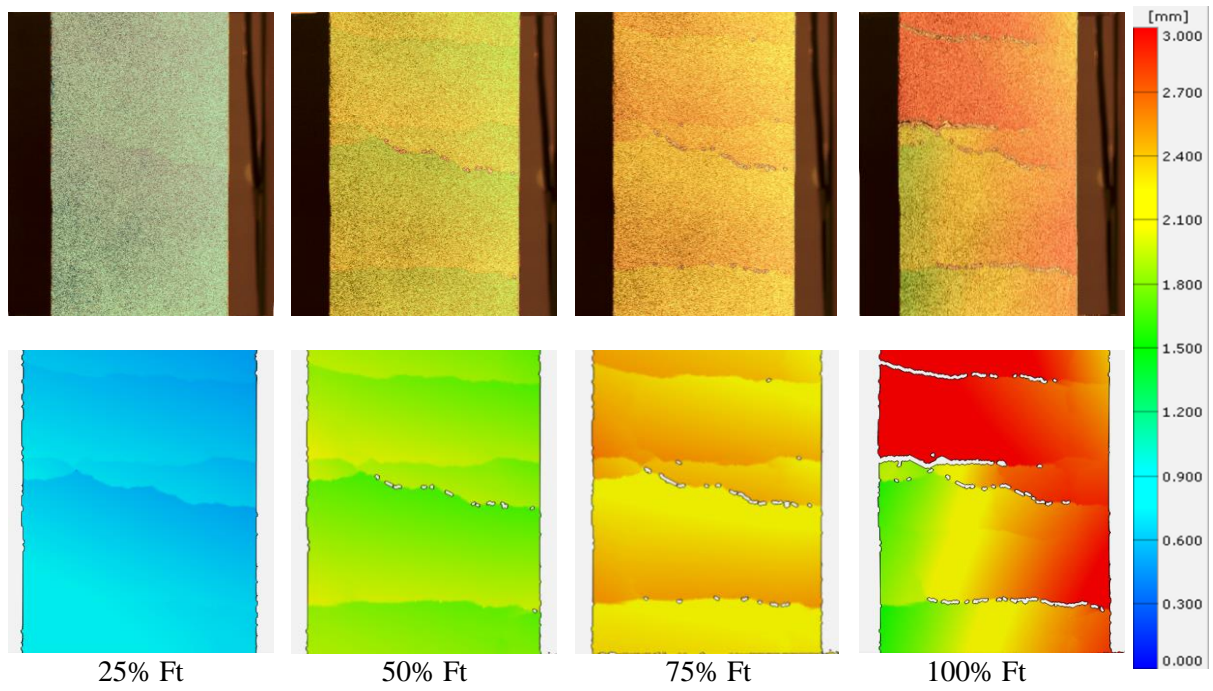


(c)

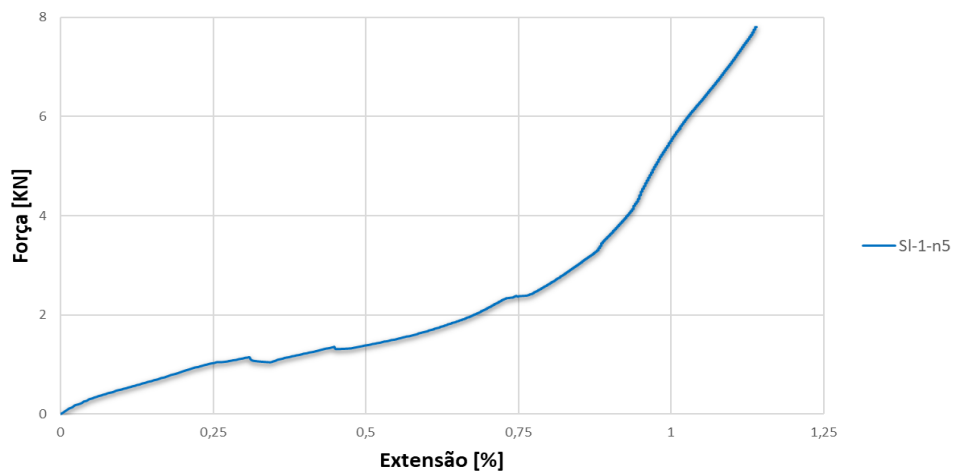
Figura 4.26 – (a) Campo de deslocamentos, (b) força-extensão e (c) abertura de fendas - provete Sk-2-n3



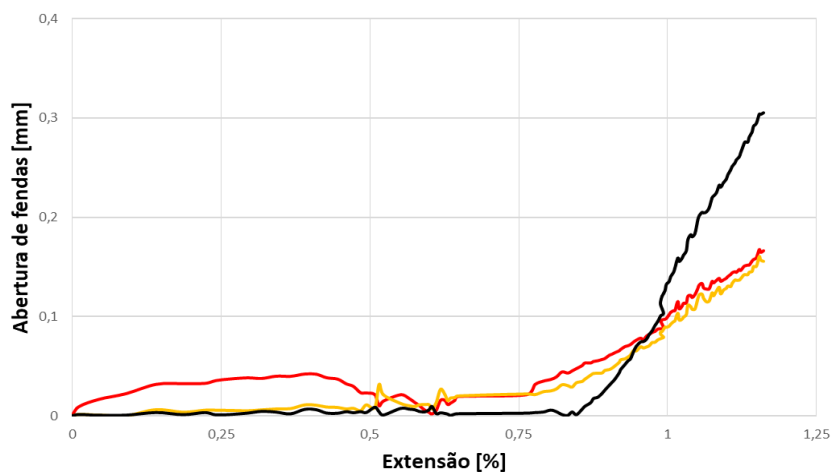
**Provete SI-1-n5**



(a)



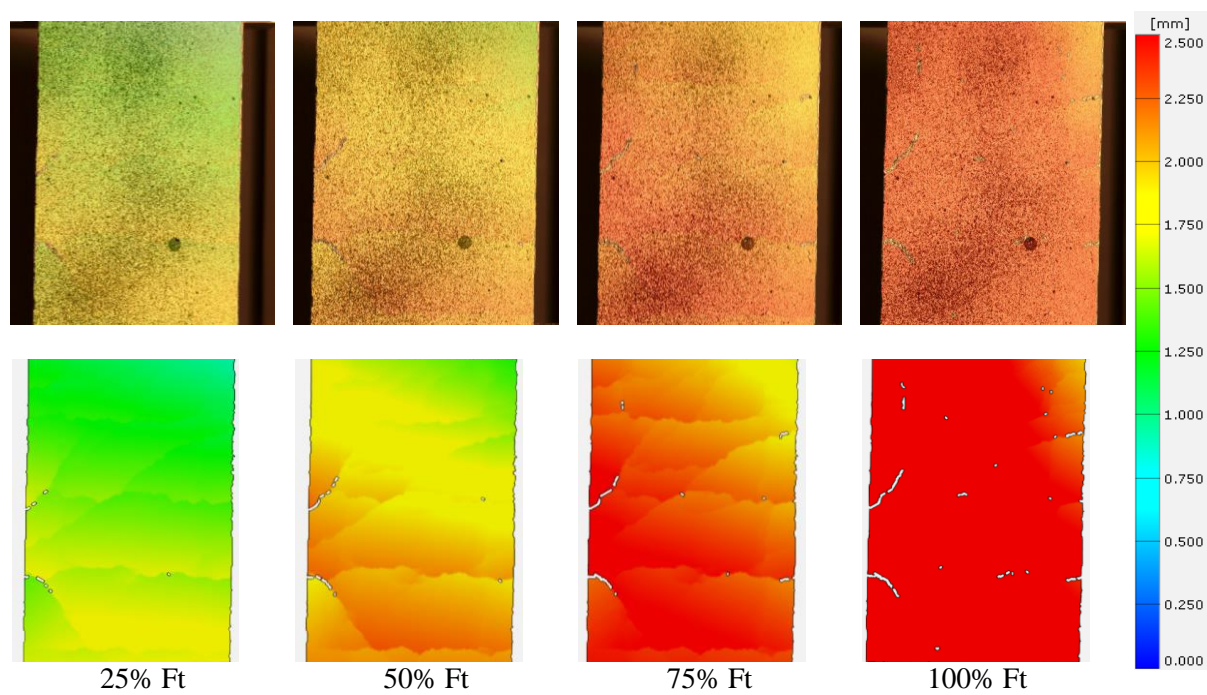
(b)



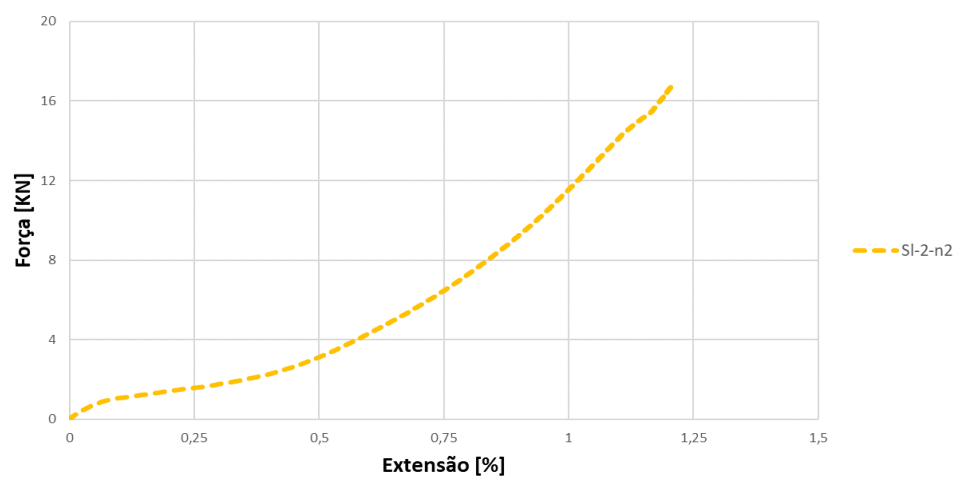
(c)

Figura 4.27 – (a) Campo de deslocamentos, (b) força-extensão e (c) abertura de fendas - provete SI-1-n5

### Provete SI-2-n2



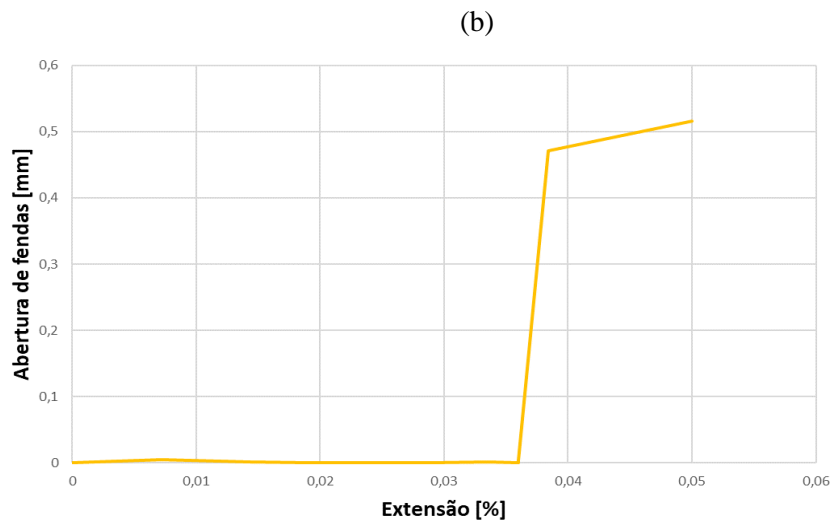
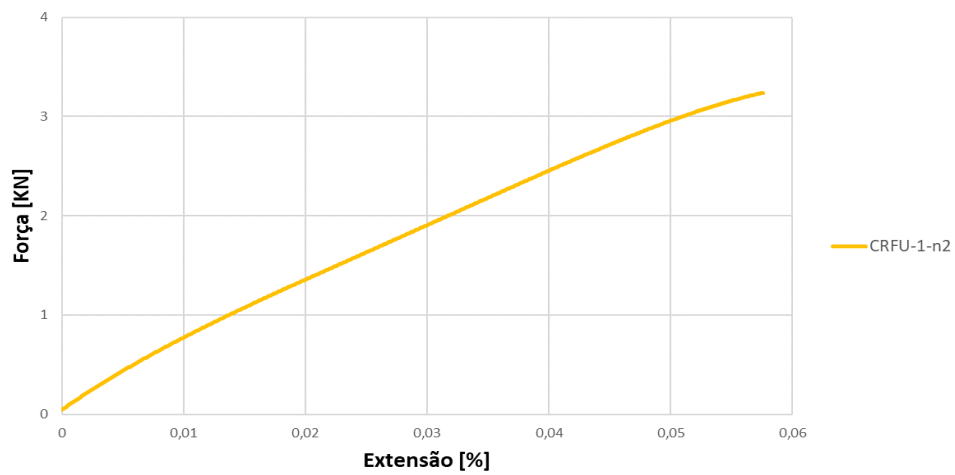
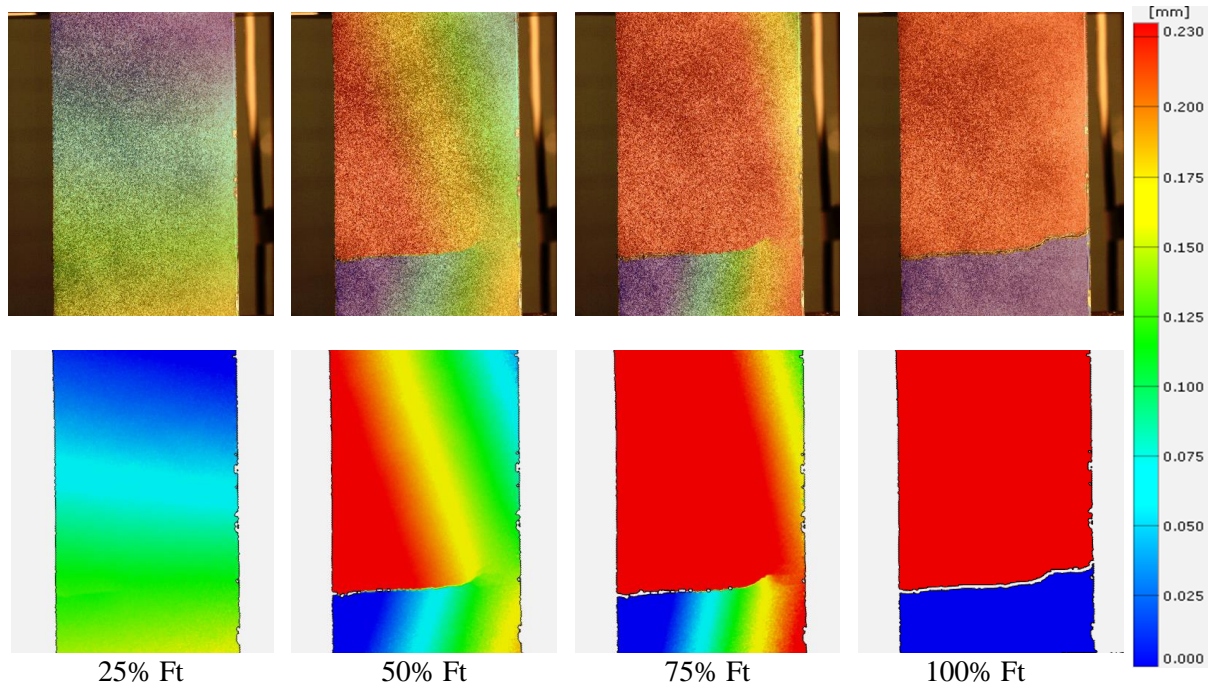
(a)



(b)

Figura 4.28 – (a) Campo de deslocamentos e (b) força-extensão - provete SI-2-n2

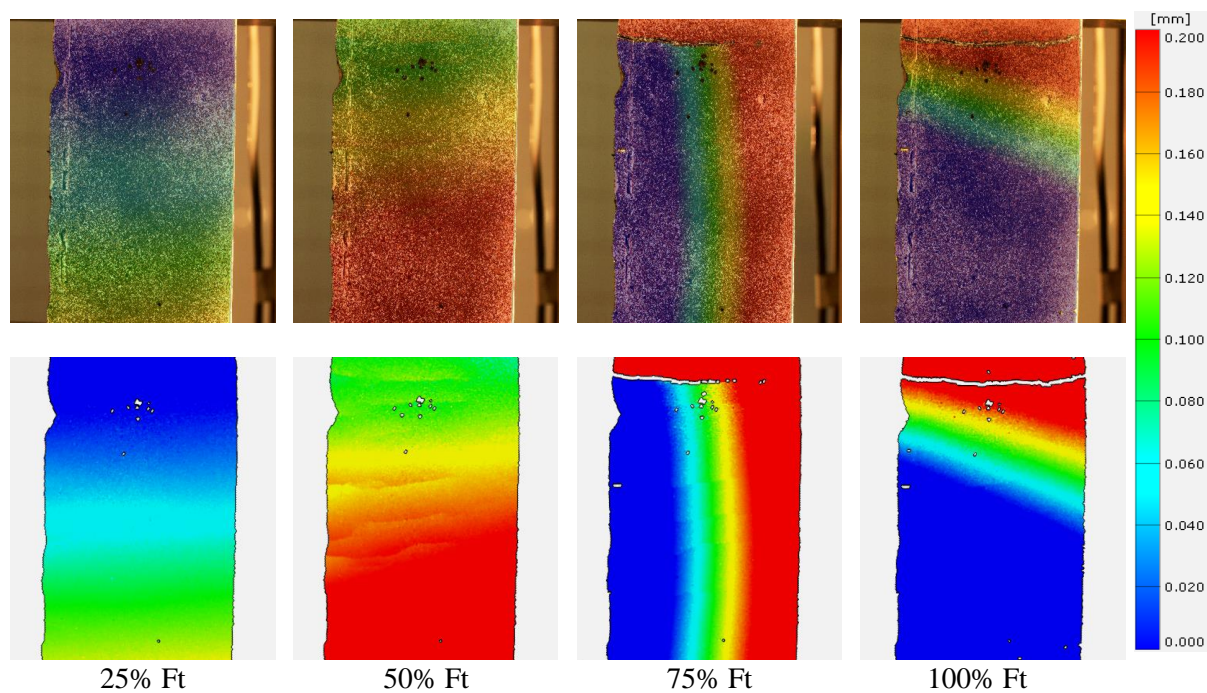
**Provete CRFU-1-n2**



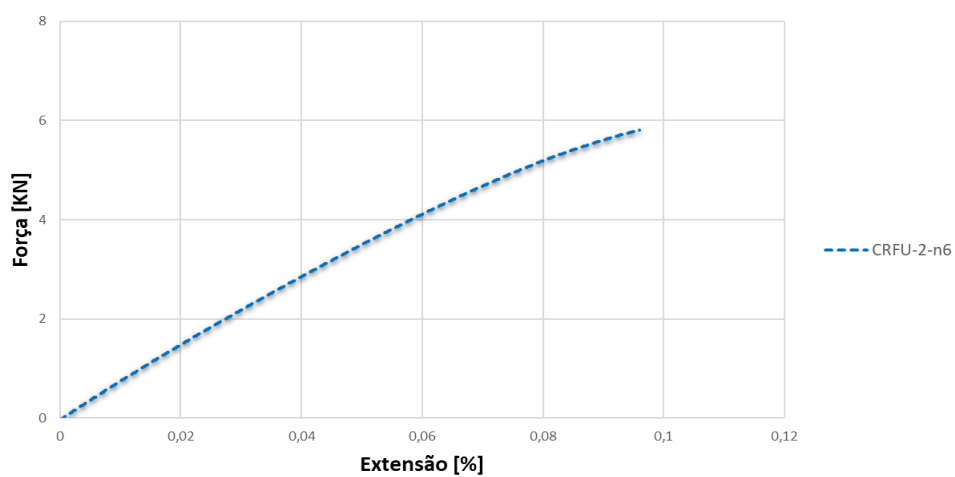
(c)

Figura 4.29 – (a) Campo de deslocamentos, (b) força-extensão e (c) abertura de fenda - CRFU-1-n2

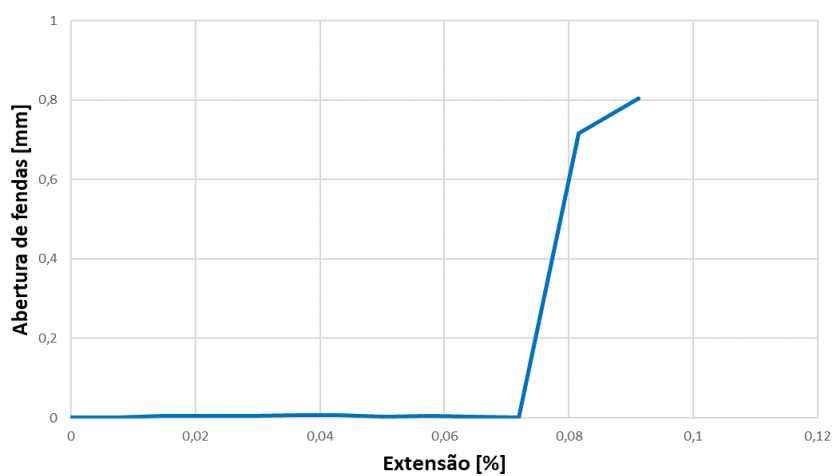
### Provete CRFU-2-n6



(a)



(b)

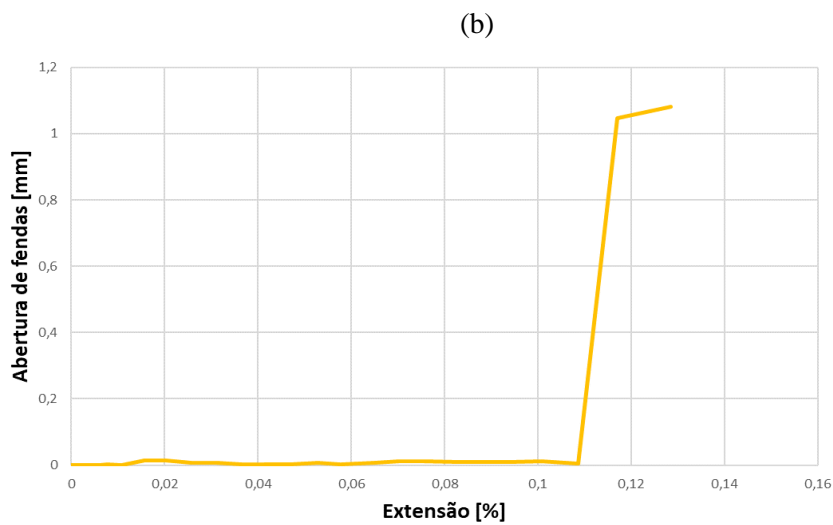
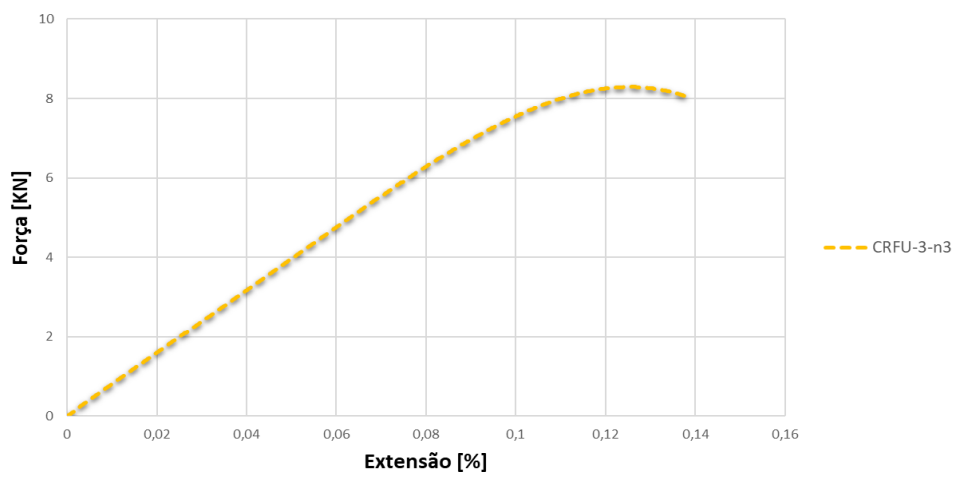
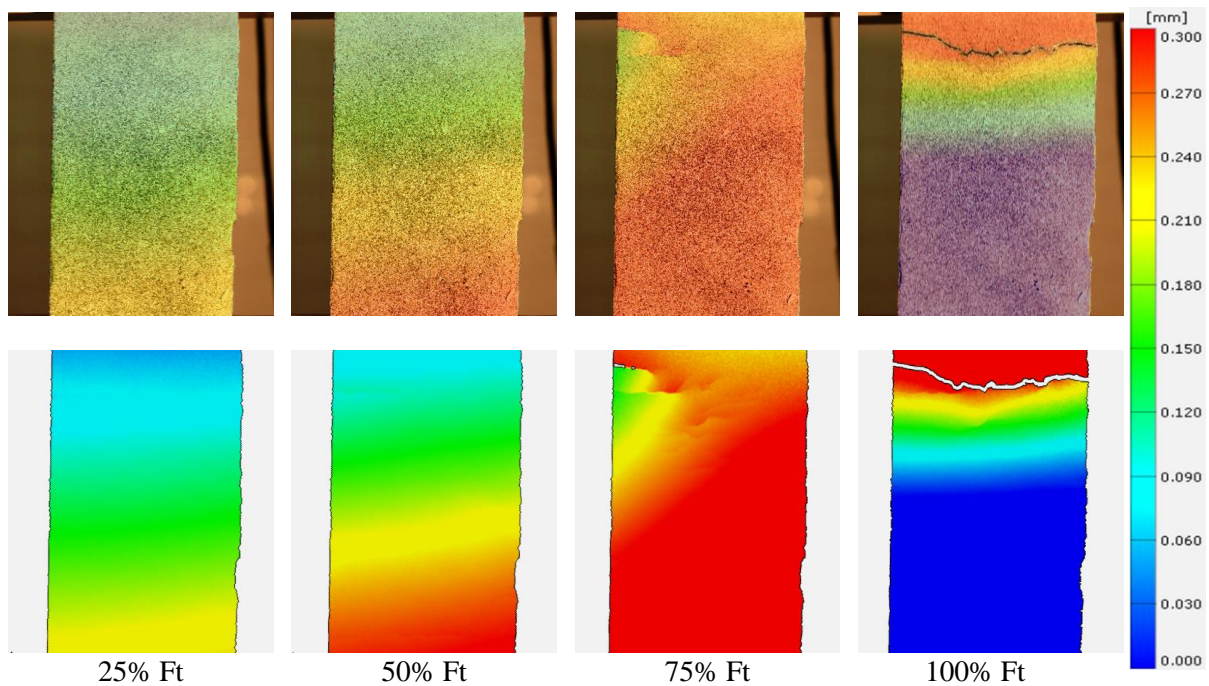


(c)

Figura 4.30 – (a) Campo de deslocamentos, (b) força-extensão e (c) abertura de fendas – CRFU-2-n6



**Provete CRFU-3-n3**



(c)

Figura 4.31 – (a) Campo de deslocamentos, (b) força-extensão e (c) abertura de fendas - CRFU-3-n3

Da análise das Figuras 4.25 a 4.28 constata-se que os deslocamentos finais da série Sk 1 e Sl 1 são superiores comparativamente à série Sk 2 e Sl 2 respetivamente. Verifica-se que o número de fendas entre as séries Sk são semelhantes, mas a abertura de fendas é superior na série Sk 1. Constata-se também que na série Sk 1 a abertura de fendas ocorre mais no final da fase 2 enquanto que na série Sk-2 esta ocorre no maioritariamente no início da fase. Relativamente à série Sl 2 não foi possível realizar análise da abertura de fendas dos provetes.

Através da análise das Figuras 4.29 a 4.31 afere-se que a série CRFU 1% apresenta deslocamentos finais inferiores às séries CRFU 2% e CRFU 3%, sendo os deslocamentos finais destas semelhantes. Constata-se que o padrão de fendas entre as séries é igual, com a formação de apenas uma fenda aquando da rotura, sendo que é possível observar a diminuição das tensões durante o processo de fendilhação (Figura 4.30 (a)). A rotura nos provetes da série CRFU 1% ocorrem em geral para 50% da força última enquanto a rotura dos provetes das séries CRFU 2% e CRFU 3% ocorram para 75%.



## 5. Modelação

A utilização de compósitos de matriz inorgânica no reforço estrutural, como os TRM e a CRFU requerem a criação de modelos numéricos que possam prever o seu comportamento mecânico e em particular as curvas força-extensão, essenciais para o dimensionamento deste tipo de sistemas. De modo a determinar a relação força-extensão dos sistemas de TRM e da CRFU estudados nesta dissertação, e a validar os resultados obtidos experimentalmente, utilizaram-se dois modelos, o de Aveston Cooper Kelly (ACK) e o Cracking Model (CM) para o TRM e o modelo CRFU para a CRFU.

### 5.1. Modelo Aveston Cooper Kelly (ACK)

O modelo ACK define teoricamente a relação tensão-extensão trilinear de um compósito de matriz com um comportamento frágil, na qual a ligação fibra-matriz se mantém intacta após o aparecimento de fendas na matriz. Este modelo assume que a ligação fibra-matriz se mantém apenas devido a forças de atrito e que o deslizamento axial da interface fibra-matriz ocorre quando se atinge a carga crítica [Aveston et al, 1971], [Cuypers & Wastiels, 2006].

Tal como se verificou no capítulo anterior, os sistemas TRM, quando sujeito a tração uniaxial, apresentam uma relação tensão- extensão que pode ser dividida em 3 fases distintas, sendo que o modelo ACK pode também dividir-se em 3 fases, sendo cada uma delas linear. Assim, é possível efetuar uma aproximação numérica do modelo aos resultados experimentais.

Segundo o modelo ACK, na primeira fase o compósito obedece à lei das misturas.

$$E_{c1} = E_f V_f + E_m V_m \quad (5.1)$$

Onde  $E_{c1}$  representa o módulo de elasticidade do compósito,  $E_f$  a rigidez das fibras,  $E_m$  o módulo de elasticidade da matriz, sendo que  $V_f$  e  $V_m$  representam a fração volumétrica das fibras e da matriz. Nesta fase, a interface fibras-matriz assume-se como sendo elástica.

A primeira fase termina quando se atinge uma determinada tensão de rotura,  $\sigma_{mc}$ . Também nesta fase a matriz apresenta uma determinada tensão de rotura ( $\sigma_{mu}$ ) e uma extensão de rotura ( $\epsilon_{mc}$ ), que influenciam o valor de  $\sigma_{mc}$ .

$$\sigma_{mc} = \frac{E_{c1} \sigma_{mu}}{E_m} \quad (5.2)$$

Ao atingir o valor de  $\sigma_{mc}$  o compósito inicia a formação de múltiplas fendas. Quando surge uma fenda na matriz e esta atinge a fibra, origina o descolamento da interface fibra-matriz devido ao enfraquecimento da ligação. Após esta etapa, considera-se uma tensão de corte ( $\tau$ ) constante devido à aderência da ligação fibra-matriz. Esta tensão permite a transferência de tensões normais da fibra para a matriz, onde o comprimento de aderência da ligação ( $\delta$ ) pode ser determinado a partir do equilíbrio de forças ao longo do eixo longitudinal da matriz [Aveston et al, 1971].

$$\delta = \frac{V_m r \sigma_{mu}}{V_f 2\tau} \quad (5.3)$$

Onde  $r$  representa o raio da fibra. Na fase de abertura de fendas, a distância entre fendas varia entre  $\delta$  e  $2\delta$ , sendo que estas ocorrem aleatoriamente até não existir mais espaço para ser formarem novas fendas. Widom [Widom, 1966] determinou que a distância média entre fendas é dada por  $X = 1.337\delta$ . Através desse valor, é possível determinar a extensão do compósito ( $\varepsilon_{mc}$ ) que caracteriza o final da fase de abertura de fendas.

$$\varepsilon_{mc} = (1 + 0.666\alpha_e) \frac{\sigma_{mu}}{E_m} \quad (5.4)$$

Onde,

$$\alpha_e = \frac{V_m E_m}{V_f E_f} \quad (5.5)$$

Após ser atingido o valor de  $\varepsilon_{mc}$ , inicia-se a terceira e última fase. Nesta fase apenas as fibras suportam a carga aplicada. Logo as tensões exercidas na matriz mantêm-se constantes apesar do aumento da carga. O módulo de elasticidade nesta fase é dado por;

$$E_{c\ III} = V_f E_f \quad (5.6)$$

No capítulo 4, caracterizaram-se as argamassas utilizadas como matriz do sistema TRM, onde se obtiveram os valores médios da tensão de rotura de 2.5 MPa, da extensão última de 0.04% e do módulo de elasticidade de 9.3 GPa no caso da matriz constituída por argamassa *Sika MonoTop 612*. Tal como foi referido no capítulo 3, não foi possível ensaiar a série Sl 0, pelo que não é possível simular os resultados experimentais das séries Sl 1 e Sl 2 com os modelos ACK e CM. Assim, através da aplicação das expressões 5.1 a 5.6, é possível aplicar o modelo ACK às séries Sk 1 e Sk 2. Os valores necessários à implementação do modelo ACK encontram-se indicados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Parâmetros do modelo ACK referentes às séries Sk-1 e Sk-2

Material	Grupo	Número de camadas	$E_f$ [GPa]	$V_m$ [-]	$V_f$ [-]	$E_{cI}$ [GPa]	$\sigma_{mc}$ [MPa]	$\varepsilon_{mc}$ [%]	$E_{c\ III}$ [GPa]
Fibra de carbono	Sk 1	1	189	0,9949	0,0051	10,2	2,7	0,194	0,97
	Sk 2	2	189	0,9899	0,0102	11,1	2,9	0,110	1,94

Nas Figuras 5.1 e 5.2 apresenta-se uma comparação entre as curvas força-extensão obtidas a partir da campanha experimental das séries Sk-1 e Sk-2, e as curvas força-extensão obtidas através do modelo ACK.

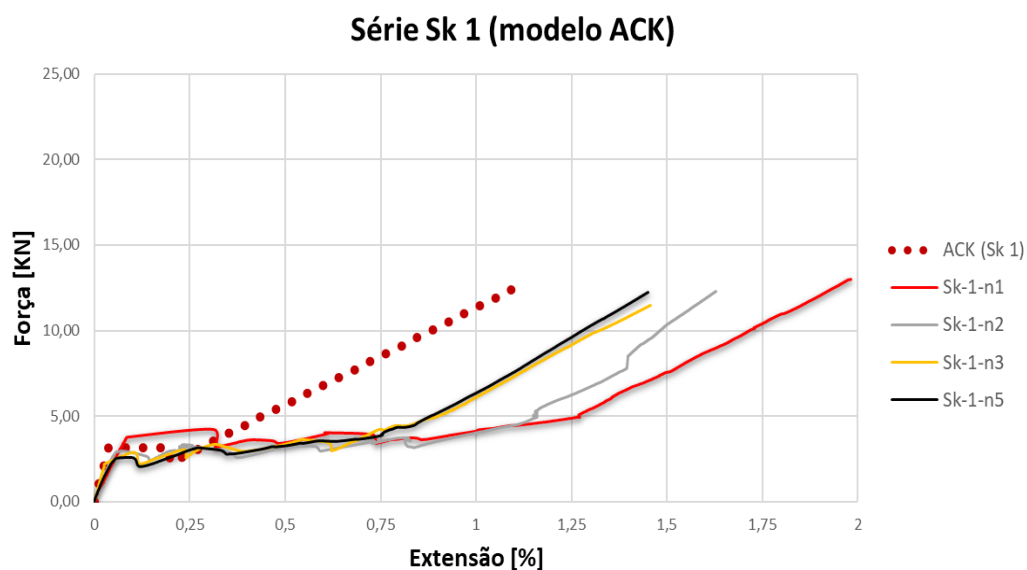


Figura 5.1 – Modelo ACK comparado à série Sk 1

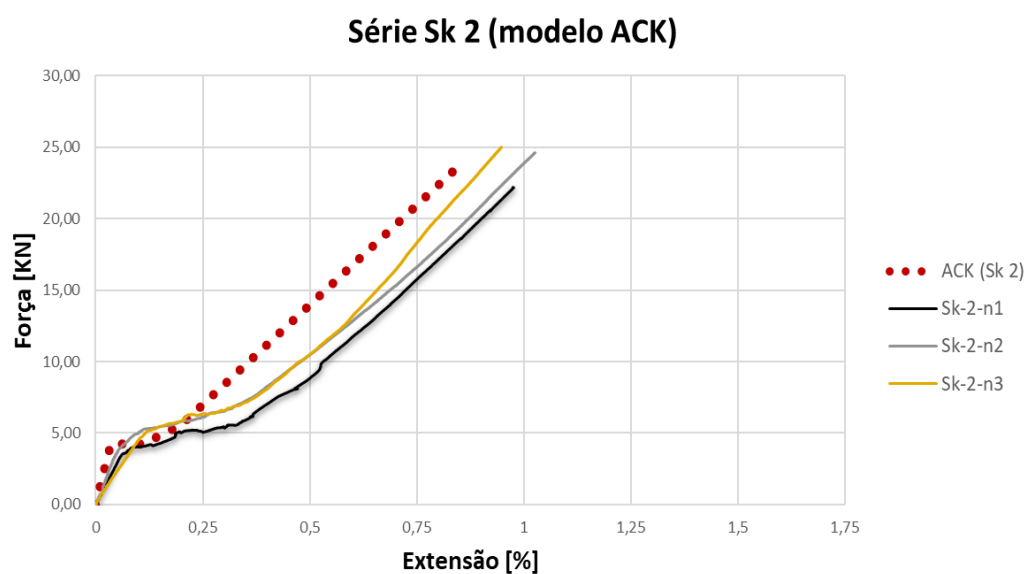


Figura 5.2 - Modelo ACK comparado à série Sk 2

A partir das Figuras 5.1 e 5.2 é possível afirmar que o comportamento global do modelo ACK é, em geral, semelhante ao dos resultados experimentais. Contudo, existe alguma discrepância na extensão observada no final da fase 2, sendo que o modelo obteve melhores resultados na série Sk 2. Numa tentativa de definir um modelo que permita uma boa aproximação ao comportamento real, estudou-se também o modelo CM.

## 5.2. Cracking Model (CM)

O Cracking Model foi proposto por Larrinaga et al (2013) e parte do princípio que os sistemas TRM por serem constituídos por fibras de reforço inseridas numa matriz inorgânica têm um comportamento que se pode assemelhar ao do betão armado (BA) dado que, se um bloco de betão armado for ensaiado à tração uniaxial, este irá apresentar 3 fases distintas. A primeira fase termina quando ocorre a fendilhação do betão e a segunda abrange a formação de fendas, ao passo que na terceira se verifica que são as armaduras que resistem à carga imposta (Figura 5.3).

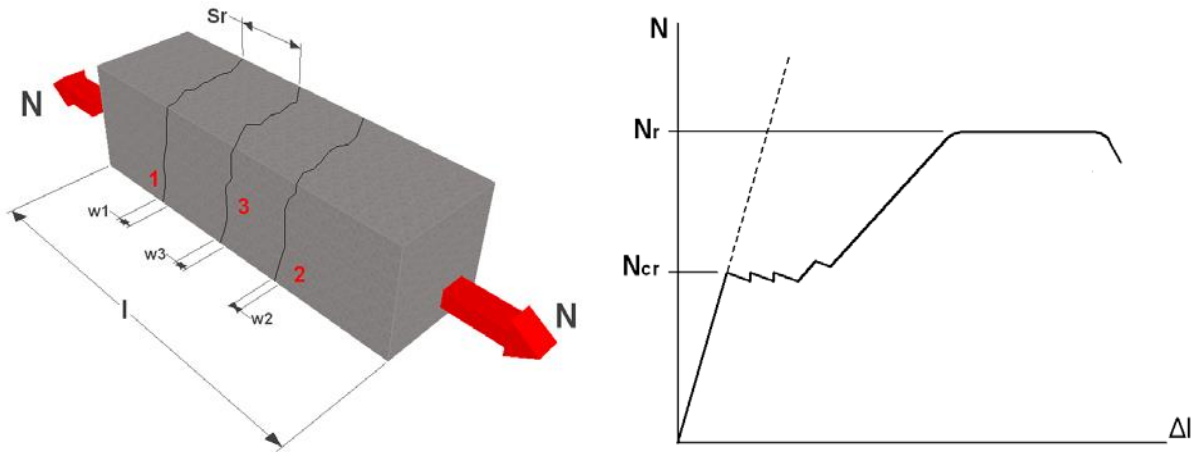


Figura 5.3 – Bloco de BA sujeito à tração uniaxial e respetivo comportamento mecânico

[Larrinaga et al, 2013]

Este comportamento mecânico é bastante semelhante ao verificado nos sistemas TRM. Logo, as premissas estabelecidas para o betão armado podem ser aplicadas aos TRM. Segundo o Eurocódigo 2 [Eurocódigo 2, 1992], a distância de abertura de fendas ( $w_k$ ) pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$w_k = s_{r,máx}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (5.7)$$

Onde  $s_{r,máx}$  representa a distância máxima entre fendas,  $\varepsilon_{sm}$  a extensão média da armadura e  $\varepsilon_{cm}$  a extensão média do betão. A totalidade da soma das aberturas de fendas é dada pela diferença entre o alongamento da armadura e o alongamento do betão,

$$\sum w = \Delta l - \Delta l_c = (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})l \quad (5.8)$$

Sendo que  $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$  pode ser calculado através da seguinte expressão,

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \quad (5.9)$$

Onde  $\sigma_s$  representa a tensão na armadura de tração, admitindo a secção fendilhada,  $k_t$  o coeficiente que traduz o valor médio de tensão do betão e que depende da duração do carregamento,  $f_{ct,eff}$  o valor de tensão para o qual surge a primeira fenda no betão,  $\alpha_e (= E_s/E_c)$  o coeficiente de homogeneização, e  $\rho_{p,eff} (= A_s/A_{c,eff})$  a taxa de armadura em relação à área de betão tracionado. De modo a aplicar as premissas estabelecidas pelo Eurocódigo 2 (EC 2) ao sistema TRM, substituiu-se a nomenclatura do EC2 pela nomenclatura utilizada no modelo ACK para permitir uma melhor compreensão dos resultados obtidos.

O modelo CM é, tal como o modelo ACK, constituído por 3 fases distintas. A primeira fase é definida pela lei das misturas (tal como no modelo ACK), sendo os valores que a definem ( $E_{c1}$ ,  $\sigma_{mc}$  e  $\varepsilon_{mu}$ ) obtidos pelas expressões 5.1 e 5.2. A segunda fase depende dos valores de  $\sigma_{mc}$  e  $\varepsilon_{mu}$  obtidos anteriormente na fase 1, sendo a extensão final ( $\varepsilon_{mc}$ ) da fase de abertura de fendas obtida a partir da expressão 5.11. Na fase 3 a abertura das fendas que se formaram na segunda fase aumenta, sendo este aumento definido pelas expressões 5.8 e 5.9. No modelo CM, a terceira fase é definida com base na expressão 5.10.

De modo a adaptar a expressão,  $\varepsilon_{cm}$  passa a representar a extensão última da matriz,  $\varepsilon_{mu}$ . O valor de  $\varepsilon_{sm}$  é substituído pela extensão na fase 3 do TRM ( $\varepsilon$ ) e, conseqüentemente, a tensão do compósito na fase 3 ( $\sigma$ ) substitui  $\sigma_s$ . Visto os materiais serem diferentes, a argamassa substitui o betão e as fibras substituem o aço na nova nomenclatura, portanto:  $E_c$  passa a  $E_m$  e  $E_s$  a  $E_f$ . Finalmente, os termos  $f_{ct,eff}$  e  $\rho_{p,eff}$  são substituídos por  $\sigma_{mc}$  e  $\alpha_e$ , sendo  $k_t$  determinado empiricamente. O valor  $k_t$  deve ser ajustado aos dados experimentais, devendo ser, para este caso, um valor constante, visto que todos os ensaios foram realizados a uma velocidade igual de 0.5 mm/min.

Após estas alterações a expressão 5.9 é definida em ordem a  $\sigma$  por:

$$\sigma = (\varepsilon - \varepsilon_{mu})E_f + k_t \frac{\sigma_{mu}}{V_f} (1 + V_f \alpha_e) \quad (5.10)$$

A expressão 5.10 representa a relação tensão-extensão da fase 3 e pode ser utilizada de forma a obter a extensão final da segunda fase (de abertura de fendas),  $\varepsilon_{mc}$ . A partir desta expressão e utilizando a tensão final  $\sigma_{mc}$  correspondente a  $\varepsilon_{mc}$ , a extensão do compósito no final da fase 2 pode ser obtida a partir da seguinte fórmula:

$$\varepsilon_{mc} = \varepsilon_{mu} + \frac{\sigma_{mc} - k_t(1 + V_f \alpha_e) \frac{\sigma_{mu}}{V_f}}{E_f} \quad (5.11)$$

A informação necessária para a aplicação do modelo CM foi extraída de [Larrinaga et al, 2013]. Os valores correspondentes à argamassa utilizada foram definidos anteriormente na aplicação do modelo ACK. Os valores obtidos da aplicação do modelo CM são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Parâmetros do modelo CM referentes às séries Sk-1 e Sk-2

Material	Grupo	Número de camadas	E f [GPa]	V m [-]	V f [-]	E c1 [GPa]	$\sigma_{mc}$ [MPa]	$\epsilon_{mc}$ [%]
Fibra de carbono	Sk 1	1	189	0,9949	0,0051	10,2	2,7	0,262
	Sk 2	2	189	0,9899	0,0102	11,1	2,9	0,161

Tal como se efetuou na aplicação do modelo ACK e de forma a confrontar com os resultados experimentais, realizou-se uma comparação das curvas força-extensão experimentais com a curva força-extensão obtida do modelo CM para as séries Sk.

### Série Sk 1 (modelo CM vs modelo ACK)

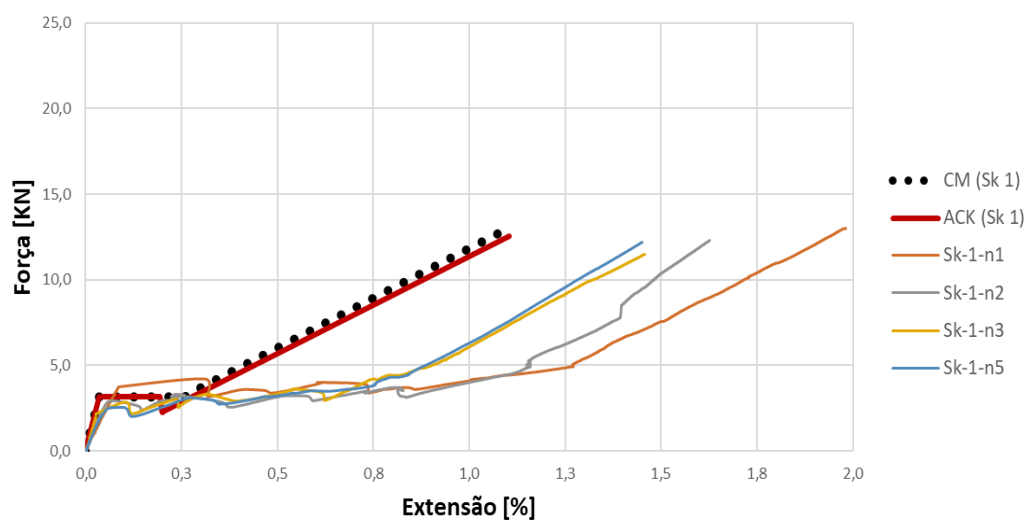


Figura 5.4 - Modelo CM comparado ao modelo ACK (série Sk 1)

### Série Sk 2 (modelo CM vs modelo ACK)

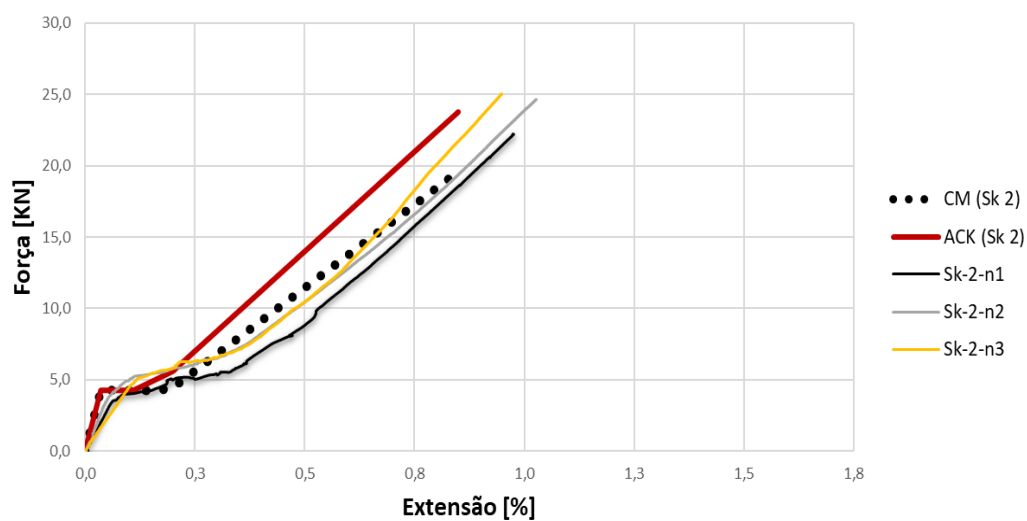


Figura 5.5 - Modelo CM comparado ao modelo ACK (série Sk 2)

A partir das Figuras 5.4 e 5.5 afere-se visualmente que os resultados obtidos através da aplicação do modelo CM são melhores comparativamente aos obtidos a partir do modelo ACK na série Sk2 porém, na série Sk 1 não se observa uma melhoria considerável na aproximação. O modelo CM permite uma melhor aproximação do valor de  $\varepsilon_{mc}$  e da fase pós fendilhação (sobretudo na série Sk 2).

### 5.3. Modelo CRFU

De modo simular o comportamento dos ensaios experimentais de CRFU é necessário conhecer as características mecânicas da matriz e das fibras de reforço do sistema. Para o efeito, começou-se por considerar os resultados da caracterização dos materiais realizada por Machado (2013), o qual caracterizou as propriedades da calda cimentícia a partir de ensaios de compressão diametral em provetes cúbicos (150x150x150 mm). Tendo obtido uma tensão de rotura à tração de 2,27 MPa ( $\sigma_m$ ).

A caracterização das propriedades das fibras de aço utilizadas como reforço no sistema CRFU foram realizadas por Gião (2012). Nestes ensaios, a autora obteve um valor médio de tensão de rotura no aço de 908.2 MPa ( $\sigma_f$ ) e um valor médio de extensão máxima no aço de 3.2 % ( $\varepsilon_{rf}$ ) (Tabela 5.3). Admitindo que o módulo de elasticidade das fibras de aço é igual a 200 GPa ( $E_f$ ), obtém-se uma extensão de cedência de 0.4541 % ( $\varepsilon_{rf}$ ). A quantidade de fibra de aço presente em cada série do sistema de CRFU é obtida a partir do produto entre o valor médio da área transversal e a respetiva percentagem de fibra. Deste modo é possível obter a relação força-extensão que caracteriza as fibras de aço utilizadas (Figura 5.6).

Tabela 5.3 - Resultados obtidos a partir da caracterização das fibras de aço

$\varepsilon$ [%]	$\sigma$ [MPa]	A (1%) [mm <sup>2</sup> ]	A (2%) [mm <sup>2</sup> ]	A (3%) [mm <sup>2</sup> ]	F (1%) [kN]	F (2%) [kN]	F (3%) [kN]
0	0				0,0	0,0	0,0
0,4541	908,2	10,9	22,2	34,6	9,9	20,2	31,4
3,2	908,2				9,9	20,2	31,4



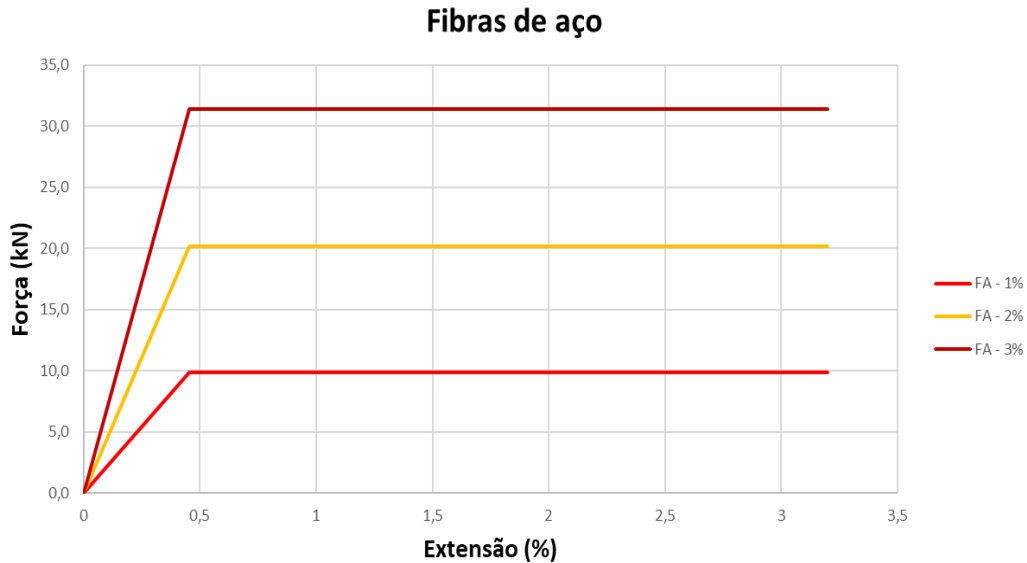


Figura 5.6 - Relação força-extensão das fibras de aço correspondente a 1%, 2% e 3% de área de fibra

O comportamento inicial do CRFU é condicionado pela rigidez inicial da Calda Cimentícia. Uma vez que não foi possível obter resultados dos ensaios de tração pura da Calda Cimentícia, optou-se por considerar na fase inicial do modelo do CRFU o módulo de elasticidade obtido da interpolação linear dos resultados conseguidos dos ensaios do CRFU para diferentes percentagens de fibra de aço, resultando assim um módulo de elasticidade dado pela seguinte expressão:

$$E_p[\text{GPa}] = 83.8(\rho) + 4 \quad (5.12)$$

Onde  $E_p$  representa o módulo de elasticidade do CRFU e  $\rho$  a percentagem de fibra de aço de cada série. Assim, substituindo  $\rho$  por 1, 2 e 3 [%] obtém-se respetivamente um módulo de elasticidade de 4,8 GPa, 5,7 GPa e 6,5 GPa (Figura 5.7).

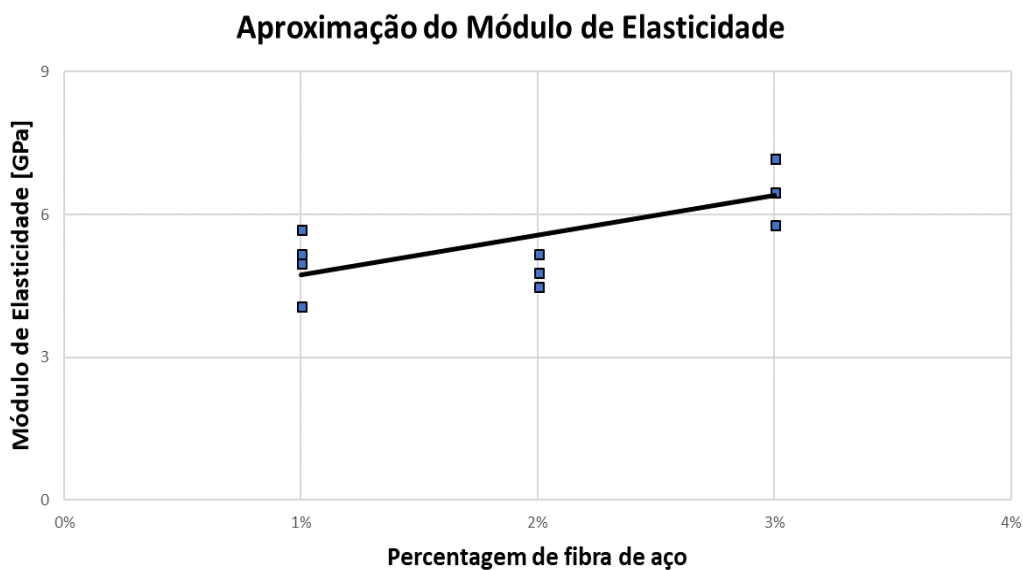


Figura 5.7 – Módulo de elasticidade do CRFU em função da percentagem de armadura

Assim, considerou-se para o CRFU um comportamento com três fases similares às do Cracking Model, em que a primeira fase é controlada pela calda cimentícia, a segunda fase corresponde à fendilhação da matriz e a terceira fase que é controlada essencialmente pela armadura. Deste modo, admitiu-se que na primeira fase o módulo de elasticidade do CRFU será dado pela expressão 5.12, obtendo-se a força de fendilhação do CRFU dada por:

$$F_p[N] = \sigma_m * A_p \quad (5.13)$$

Considerando a área média da seção transversal dos provetes das séries CRFU 1%, CRFU 2% e CRFU 3% respetivamente de 1087.8 mm<sup>2</sup>, 1111.2 mm<sup>2</sup> e 1152.3 mm<sup>2</sup>, é possível obter a força a que o CRFU fendilha (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 - Força de fendilhação do CRFU

$\sigma$ [MPa]	A (1%) [mm <sup>2</sup> ]	A (2%) [mm <sup>2</sup> ]	A (3%) [mm <sup>2</sup> ]	F (1%) [kN]	F (2%) [kN]	F (3%) [kN]
0	1087,8	1111,2	1152,3	0,0	0,0	0,0
2,27				2,47	2,52	2,62

Na segunda fase, com a abertura das fendas no CRFU, assumiu-se, à semelhança do Cracking Model, que este terá um patamar de força constante até que seja alcançada a terceira fase dominada pela rigidez das armaduras.

De forma a obter um comportamento mais próximo do observado experimentalmente definiu-se um critério de rotura do modelo CRFU com base nos valores da extensão de rotura dos provetes ensaiados das diferentes séries (Figura 5.8).

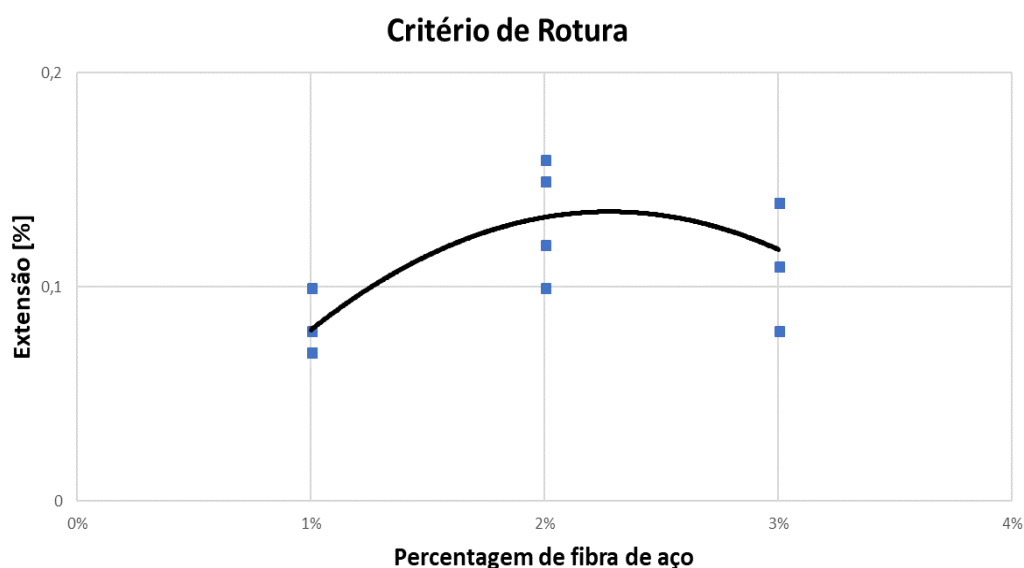


Figura 5.8 - Critério de rotura do modelo CRFU em função da percentagem de fibra de aço

O valor da extensão de rotura do modelo é desta forma, dado por;

$$\varepsilon_{cr} = -232(\rho)^2 + 11(\rho) \quad (5.14)$$

Onde  $\varepsilon_{cr}$  representa a extensão de rotura do modelo CRFU e  $\rho$  a percentagem de fibra de aço de cada série. Assim, substituindo  $\rho$  por 1, 2 e 3% [%] obtém-se respetivamente uma extensão de rotura de 0,087%, 0,127% e 0,121%, e consequentemente uma força de rotura de 2,5 kN, 5,7 kN e 8,4 kN, respetivamente para as séries CRFU 1%, CRFU 2% e CRFU 3%. O facto de a extensão de rotura da série CRFU 3% ser inferior ao da série CRFU 2% pode ser justificado pela presença de um maior número de vazios nesta série, o que leva à diminuição desta extensão.

Nas Figuras 5.9 a 5.11 compara-se o modelo do CRFU baseado no Cracking Model com os resultados experimentais das séries CRFU 1%, CRFU 2% e CRFU 3%.

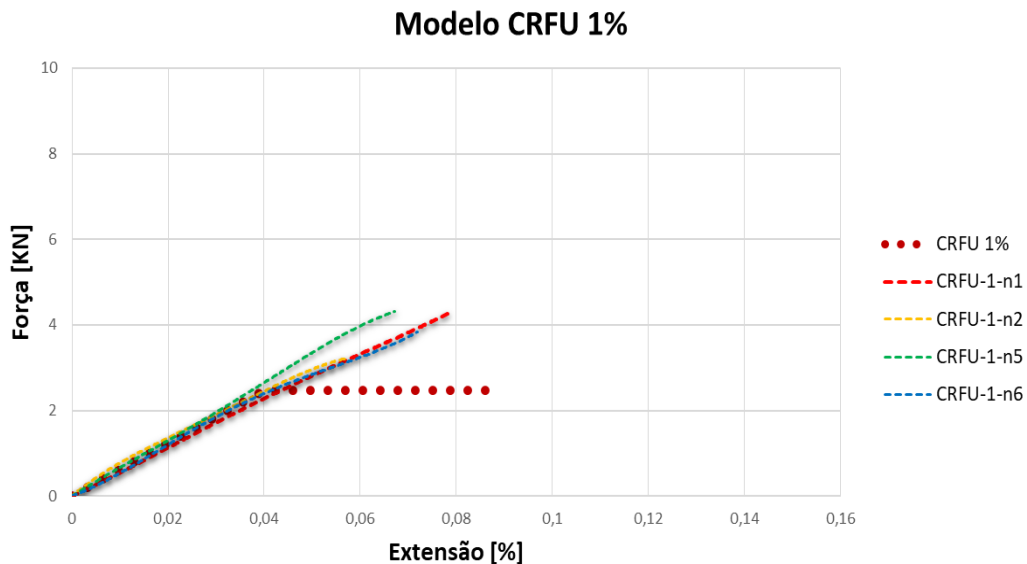


Figura 5.9 – Modelo CRFU comparado à série CRFU 1%

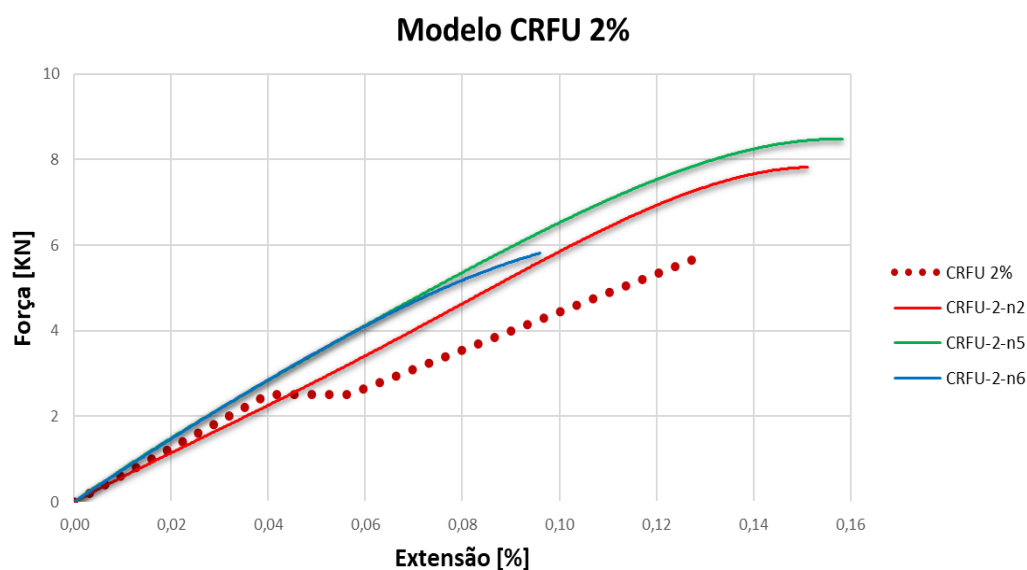


Figura 5.10 - Modelo CRFU comparado à série CRFU 2%

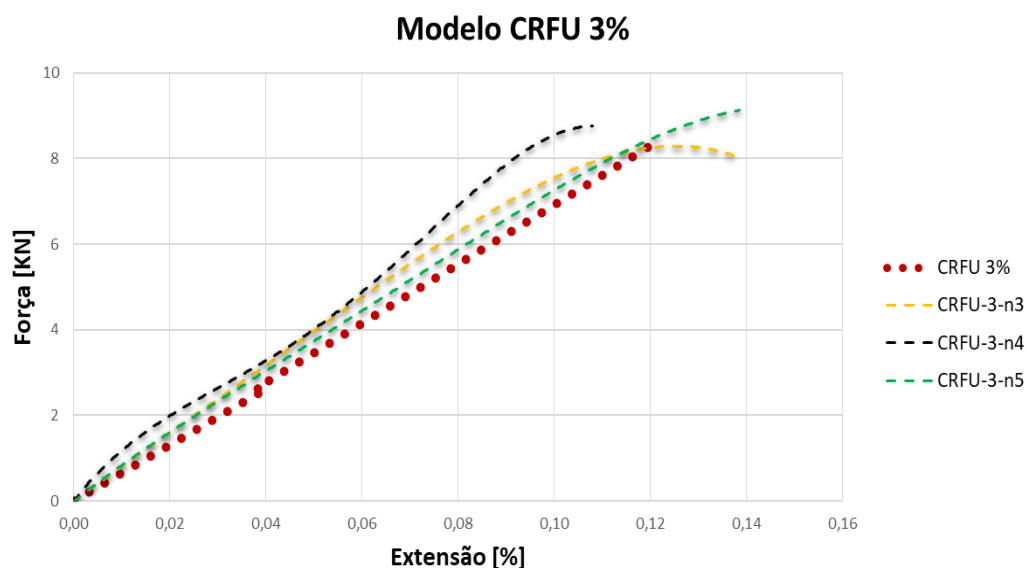


Figura 5.11 - Modelo CRFU comparado à série CRFU 3%

Analisando a simulação obtida com o modelo CRFU para os resultados experimentais das séries CRFU 1, 2 e 3%, consta-se que o modelo se aproxima de forma razoável dos resultados da série CRFU 3%. Contudo, a fase de fendilhação é mais pronunciada nos modelos CFRU 1 e 2% do que nos ensaios experimentais. Este fenómeno poderá estar relacionado com o facto de as fibras não estarem completamente esticadas devido ao seu processo de fabrico e à moldagem dos provetes de CRFU. Comparando os resultados experimentais, os resultados obtidos com o modelo CFRU e o diagrama da Figura 5.6 verifica-se que o comportamento do CRFU se encontra bastante aquém do seu potencial.



## 6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

### 6.1. Considerações finais

O trabalho realizado na presente dissertação focou-se principalmente no estudo do comportamento à tração de compósitos de matriz inorgânica. Para tal, realizaram-se ensaios de tração simples sob carga monotónica de sistemas de reforço TRM e CRFU, com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico destes sistemas e o seu modo de rotura, obtendo para o efeito as curvas força-extensão, bem como os valores do módulo de elasticidade e da força, tensão e extensão na rotura dos provetes ensaiados.

#### **Sistema TRM**

De modo a avaliar a influência da aplicação de diferentes argamassas como matriz do sistema de TRM e a aplicação de várias camadas de reforço, executaram-se 25 ensaios de tração simples em provetes retangulares com 850 mm de comprimento, 120 mm de largura e 10 mm de espessura. Estes provetes foram divididos em séries (Sk 0, Sk 1, Sk 2, Sl 1 e Sl 2) distinguidas a partir do número de camadas de reforço e do tipo de matriz utilizada. Seguidamente, apresentam-se detalhadamente as considerações finais obtidas a partir dos resultados da campanha experimental.

A partir dos ensaios realizados à fibra de carbono (utilizada como armadura do sistema de TRM), determinou-se o valor de 2.8 kN para a força máxima (suportada por um fio de fibra), de 0.73% como a extensão máxima na rotura e 191 GPa como o módulo de elasticidade. De modo a determinar os valores mencionados, considerou-se uma área transversal por fio de 2.03 mm<sup>2</sup> obtida a partir da bibliografia existente [Larrinaga, 2011], pois o valor da densidade da fibra de carbono utilizada não foi fornecido pelo fabricante.

Para os provetes da série Sk 0 (série de referência executada com argamassa *Sika MonoTop 612* de origem cimentícia e sem fibras de reforço), obteve-se o valor médio de 3.1 kN para a força máxima, e 2.5 MPa e 0.04% para a tensão e a extensão de rotura, respetivamente, enquanto o módulo de elasticidade foi de 9.3 GPa. Note-se que os provetes de referência da série Sl 0 (executada com argamassa Secil Reabilita Cal Consolidação, de cal hidráulica natural) não foram ensaiados, pois estes não possuíam resistência suficiente que lhes permitisse serem descofrados sem serem danificados ou fendilharem.

No caso das séries Sk 1 e Sk 2 (com uma e duas camadas de fibras, respetivamente), os valores médios de força, tensão, extensão e módulo de elasticidade (da fase 3, denominada por fase pós-fendilhação) obtidos foram, respetivamente de 12.2 KN, 2015.4 MPa, 1.63% e 201.9 GPa para a série Sk 1. Por sua vez, na série Sk 2 foram obtidos os correspondentes valores de 24.2 KN, 1987.3 MPa, 1.01% e 238.4 GPa.



A partir dos resultados mencionados, constata-se que a série Sk 2 apresenta um módulo de elasticidade e um valor de força superior comparativamente à série Sk 1, mas esta apresenta uma resistência à tração superior. O valor de 1.63% de extensão obtido pela série Sk 1 pode ser justificado pelo facto de os provetes não possuírem armadura mínima de controlo de fendilhação, o que levou ao aumento de duração da fase 2 (denominada por fase de fendilhação) e, consequentemente, ao aumento da extensão, pois o aumento do número de camadas de reforço diminui a duração da fase 2.

Relativamente às séries Sl 1 e Sl 2 (com uma e duas camadas de fibras, respetivamente), os valores médios de força, tensão, extensão e módulo de elasticidade (da fase 3) obtidos foram, respetivamente de 9.1 KN, 1490.3 MPa, 1.27% e 188 GPa para a série Sl 1, enquanto na série Sl 2 obtiveram-se os valores homólogos de 15.5 KN, 1275.6 MPa, 1.08% e 177.3 GPa. Tal como ocorreu na série Sk 1, a extensão de 1.27% da série Sl 1 pode ser justificado pelo facto de esta não possuir a quantidade de armadura mínima de controlo de fendilhação.

Através das Figuras 4.15 e 4.17 e dos resultados obtidos das séries Sk e Sl, pode-se avaliar a influência da aplicação de uma matriz de origem cimentícia ou de uma matriz de cal hidráulica natural no sistema de TRM.

Constata-se que as séries Sk apresentam valores superiores às séries Sl, em termos de resistência e rigidez, atendendo às características superiores da argamassa da matriz. Em termos de espaçamento e abertura de fendas, as séries Sk apresentam uma maior distribuição das fendas e, consequentemente, um espaçamento menor destas. Através da análise do campo de deslocamentos observado ao longo dos ensaios, foi possível constatar que a abertura de fendas das séries Sk 1 e Sl 1 era superior à das séries Sk 2 e Sl 2, respetivamente. O modo de rotura frágil ocorreu em todos os provetes, independentemente do tipo de matriz ou do número de camadas de reforço.

Os resultados obtidos experimentalmente da série Sk foram simulados através de dois modelos numéricos, o de Aveston Cooper Kelly (ACK) e o *Cracking Model* (CM), tendo-se constatado que o modelo CM permite obter uma melhor aproximação aos resultados experimentais comparativamente ao modelo ACK, sobretudo em termos de extensões na fase 2 e na fase 3 de pós fendilhação.

### **Sistema CRFU**

De forma a analisar a influência da quantidade de fibras de aço no desempenho do sistema CRFU, ensaiaram-se à tração uniaxial 18 provetes prismáticos (6 por série) com 850 mm de comprimento, 100 mm de largura e 10 mm de espessura, onde se variou a percentagem de fibra entre 0% e 3% (séries CRFU 1%, CRFU 2% e CRFU 3%). De seguida, apresentam-se detalhadamente as conclusões obtidas a partir dos resultados da campanha experimental.

Os provetes de referência (sem fibras de aço) da série CRFU 0% acabaram por não ser ensaiados, pois não possuíam resistência suficiente que permitisse o aperto das garras da máquina de tração. Em relação às séries CRFU 1%, CRFU 2% E CRFU 3%, estas apresentaram na rotura valores

médios de força de 3.9, 8.5 e 8.7kN, de tensão de 334.8, 350.2 e 227.9 MPa, de extensão de 0.08, 0.13, e 0.12%, e de módulo de elasticidade de 5.0, 4.8 e 6.7 GPa, respetivamente. Analisando os resultados obtidos, constata-se que a força de rotura da série CRFU 1% foi inferior à suportada pelas séries CRFU 2% e CRFU 3%. Em termos de resistência à tração, a série CRFU 2% foi a que apresentou melhores resultados, ao contrário da série CRFU 3% que, inclusive, obteve uma resistência menor comparativamente à série CRFU 1%. Estes resultados podem ser justificados pelo facto do processo de execução dos provetes de CRFU 3% ser mais complexo comparativamente aos provetes com menor percentagem de armadura. Devido à elevada percentagem de fibra de aço utilizada, o número de vazios presentes nos provetes desta série é superior em comparação às restantes, o que afeta a tensão suportada pelos mesmos.

Relativamente aos valores de extensão, estes são relativamente baixos devido à elevada rigidez da matriz (calda cimentícia) do compósito. As séries CRFU 2% e CRFU 3% apresentaram valores médios de extensão semelhantes, mas superiores à série CRFU 1%.

Através da análise dos padrões de fendas e da zona de rotura de cada provete, pode-se concluir que todos os provetes apresentaram uma única fenda aquando da sua rotura (frágil), independentemente da percentagem de fibra de aço utilizada, característica que pode ser justificada pela elevada rigidez do compósito e pelo facto de não existir escorregamento suficiente das fibras de aço, pois a fibra apresenta uma esbelteza que tende para infinito, pelo que a abertura de fendas é praticamente indetetável. Logo, ao atingir a sua carga de rotura, estas rompem imediatamente, originando a rotura do compósito. Portanto, conclui-se a resistência das fibras é muito superior e não se consegue explorar a capacidade total das mesmas (tal como se observa a partir do modelo numérico CRFU).

Os resultados obtidos experimentalmente da série CRFU foram simulados através de um modelo proposto, semelhante ao Cracking Model utilizado para a simulação do sistema TRM, tendo-se obtido com este modelo uma aproximação razoável aos resultados experimentais da série CRFU 3%. Através da análise com o modelo proposto, constata-se que o comportamento do CRFU se encontra bastante aquém do seu potencial.

### **Obtenção do campo de deslocamentos através da técnica DIC**

Com o objetivo de obter o campo de deslocamentos e de analisar a abertura de fendas utilizou-se o software *GOM Correlate*, um programa que permite fazer a correlação de imagens digitais (DIC). Da análise dos resultados, constata-se que a utilização da técnica DIC na obtenção de deslocamentos em materiais de rotura frágil necessita ainda de alguma investigação complementar, uma vez que os deslocamentos relativos obtidos com a técnica DIC apresentam um desvio razoável relativamente aos obtidos com meios tradicionais (LVDT), em especial devido à presença das fendas que ocorreram no ensaio, não sendo por isso possível comparar os gráficos Força-Deslocamento obtidos experimentalmente com os gráficos obtidos do software utilizado. Porém, foi possível de efetuar o

estudo da abertura de fendas (na zona analisada de 200 mm) ocorrida nos ensaios das séries Sk e Sl, podendo-se concluir que a abertura de fendas foi superior nas séries com apenas uma camada de reforço e que o número de fendas foi semelhante entre as séries executadas com a mesma argamassa. Constatou-se também, o aparecimento de apenas uma fenda nas séries ensaiadas com o sistema CRFU e que o valor da abertura desta fenda é semelhante entre as séries CRFU 2% e CRFU 3% e superior aos valores obtidos na série CRFU 1%.

## **6.2. Desenvolvimentos futuros**

Como possíveis desenvolvimentos futuros referem-se no caso do TRM, o estudo deste compósito com outras matrizes, outras fibras de reforço e diferentes percentagens de armadura, bem como o estudo da aderência entre as fibras e a matriz para diferentes matrizes e tipos de fibras. Outros aspetos a avaliar serão a durabilidade do compósito de TRM face a diferentes agentes ambientais e o seu comportamento face a ações cíclicas. No que diz respeito ao CRFU, será pertinente proceder à otimização do processo de execução dos provetes e da disposição das fibras de aço, a conceção de um outro setup do ensaio, a avaliação do comportamento cíclico do CFRU e o estudo da sua durabilidade face a diferentes agentes ambientais.

## Referências bibliográficas

### A

ACI Committee 440 (2004). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. American Concrete Institute, ACI 440.2R-08, Detroit.

Ali, A., Abdalla, J., Hawileh, R. & Galal, K. (2014). CFRP mechanical anchorage for externally strengthened RC beams under flexure. *Physics Procedia*. Elsevier, Vol. 55, pp. 10 – 16, 2014.

Almeida, G., F. Melício, H. Biscaia, C. Chastre and J. M. Fonseca (2016). "In-Plane Displacement and Strain Image Analysis." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 31(4): 292-304

Antunes, M. & Freitas, M. (Expresso, 2017). <http://expresso.sapo.pt/economia/2017-06-10-Alerta-vermelho-para-a-reabilitacao-em-Lisboa#gs.p57vaT0> [Acedido a 3 de Novembro de 2017]

Aveston, J., Cooper, G. & Kelly, A. (1971). Single and Multiple Fracture, the Properties of Fibre Composites. *Proceedings of the Conference National Physical Laboratories, IPC Science and Technology Press Ltd. London*, pp. 15-24.

### B

Bayer, D. & Richter, M. (2010). On the Crack Opening in Textile Reinforced Concrete Science, Volume I, pp. 91-101.

BS EN 1015-11: Methods of Test For Mortar For Masonry: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.

Biscaia, H. (2011). Degradation of the bond between external GFRP reinforcement and concrete beams. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Especialidade Estruturas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNL.

Biscaia, H.; N. Franco; C. Chastre (2018). “Stainless steel bonded to concrete: An experimental assessment using the DIC technique”. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. <https://doi.org/10.1186/S40069-018-0229-8>

Bournas, D. (2008). Strengthening and Seismic Retrofitting of RC Columns with Advanced Materials: Textile Reinforced Mortar, Near Surface Mounted FRP or Stainless-Steel Reinforcement. Doctoral Thesis, University of Patras, Greece.

Bournas, D. & Triantafillou, T. (2008). Innovative seismic retrofitting of old-type RC columns through jacketing: Textile-Reinforced Mortars (TRM) versus Fiber-Reinforced Polymers (FRP). The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China.

Brás, A., Gião, A., Lúcio, V. & Chastre, C. (2012). Development of an injectable grout for concrete repair, Elsevier, Cement & Concrete Composites. Lisboa.

Brueckner, A., Ortlepp, R. & Curbach, M. (2006). Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear. Materials and Structures. Dresden, Germany.

## C

Chastre, C. (2005). Comportamento às Acções Cíclicas de Pilares de Betão Armado Reforçados com Materiais Compósitos. Tese de Doutoramento. FCT-UNL.

Chastre, C. & Silva, M. (2010). Monotonic Axial Behavior and Modelling of RC Circular Columns Confined with CFRP. Engineering Structures, 32, pp.2268-2277.

Cuyper, H. & Wastiels, J. (2006). A Stochastic Cracking Theory for the Introduction of Matrix Multiple Cracking in Textile Reinforced Concrete under Tensile Loading. Proceedings of the 1st International RILEM Symposium. RILEM Technical Committee 201-TRC. Aachen, Germany. pp193-202.

## D

Dilthey, U., Schleser, M., Möller, M. & Weichold, O. (2006). Application of Polymers in Textile Reinforced Concrete – From the Interface to Construction Elements. Proceedings of the 1st International RILEM Conference on Material Science – MATSCI, Aachen, Germany, pp.55-65.

DIN 1048-5 (1991): Testing concrete; Testing of hardened concrete (specimens prepared in mould).

Dolatabadi, M., Janetzko, S., Gries, T., Kang, B. & Sander, A. (2010). An Analytical Investigation of Cement Penetration within Bundle of Fibers. International RILEM Conference on Material Science – MATSCI, Aachen. Vol. I, pp. 69-78.

## E

Ehsani, M. (2005). Strengthening of Concrete and Masonry Structures with Fiber Reinforced Polymers (FRP). 30th Conference on Our World in Concrete & Structures. Singapore.

Escrig, C., Gila, L., Bernat-Masoa, E. & Puigvert, P. (2015). Experimental and Analytical Study of Reinforced Concrete Beams Shear Strengthened with Different Types of Textile Reinforced Mortar.

Eurocode 2. Design of concrete structures – Part 1. Common Rules for Building and Civil Engineering Structures. prEN 1992-1. CEN (Comité Européen de Normalisation). European Committee for Standardisation, Central Secrétariat, Brussels. 2004.

Engenharia & Construção (2011): <http://www.engenhariaeconstrucao.com/2011/01/evolucao-da-producao-de-betao-pronto-em.html> [Consultado a 12 de Outubro de 2017]

## F

Faella, C., Martinelli, E., Nigro, E. & Paciello, S. (2009). Shear Capacity of Masonry Walls Externally Strengthened by a Cement-based Composite Material: An Experimental Campaign.” *Construction and Building Materials*, Volume 24, Issue 1, pp. 84-93.

## G

García, D. (2010). Experimental and Numerical Analysis of Stone Masonry Walls Strengthened with Advanced Composite Materials. Doctoral Thesis, University of the Basque Country, Spain.

Garmendia, L. (2010). Rehabilitation of Masonry Arches by a Compatible and Minimally Invasive Strengthening System. Doctoral Thesis, University of the Basque Country, Spain.

Gião, A. (2012). Ligação Viga-Pilar de Alto Desempenho Sísmico. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Especialidade Estruturas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNL.

Gião, R., Lúcio, V. & Chastre, C. (2016). Characterisation of Unidirectional Fibre Reinforced Grout as a Strengthening Material for RC Structures.

GOM Correlate: <https://www.gom.com/3d-software/gom-correlate.html> [Acedido a 29 Setembro de 2017]

## H

Haüßler-Combe, U. & Hartig, J. (2007). Bond and Failure Mechanism of Textile Reinforced Concrete (TRC) Under Uniaxial Tensile Loading. *Cement & Concrete Composites*, 29, pp. 279-289.

Hegger, J., Will, N., Bentur, A., Curbach, M., Jesse, F., Mobasher, B., Peled, A. & Wastiels, J. (2006). Mechanical Behaviour of Textile Reinforced Concrete. Textile Reinforced Concrete. State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC. Ed. Bramehuber W. ISBN:2-912143-99-3. pp. 135.

Hegger, J. & Voss, S. (2008). Investigations on the Bearing Behaviour and Application Potential of Textile Reinforced Concrete. *Engineering Structures*, 30, pp. 2050-2056.

## I

INE, Instituto Nacional de Estatística. (2011). Recenseamento Geral da Habitação. Censos 2011.

INE, Instituto Nacional de Estatística. (2017). Estatísticas da Construção e Habitação, 2017.

## K

Keil, A., Cuypers, H., Raupach, M. & Wastiels, J. (2008). Study of the Bond in Textile Reinforced Concrete: Influence of Matrix and Interface Modification. *Proceedings of the CCC Challenge for Civil Construction*, Porto.



## L

Larbi, A., Contamine, R., Ferrier, E. & Hamelin, P. (2010). Shear strengthening of RC Beams with Textile Reinforced Concrete (TRC) Plate. *Construction and Building Materials*. Elsevier, Vol. 24, pp. 1928–1936. Cedex, France.

Larrinaga, P. (2011). Flexural Strengthening of Low-Grade Concrete Through the Use of New Cement-Based Composite Materials. Doctoral Thesis, University of the Basque Country, Spain.

Larrinaga, P., Chastre, C., San-José, J. & Garmendia, L. (2013). Non-Linear Analytical Model of Composites Based on Basalt Textile Reinforced Mortar Under Uniaxial Tension. *Composites: Part B*, vol. 55, pp. 518–527.

Larrinaga, P., San-José, J., García, D., Garmendia, L. & Díez, J. (2010). Experimental Study of the Flexural Behaviour of Low Performance RC Beams Strengthened with Textile Reinforced Mortar. *Proceedings of the International RILEM Conference on Material Science -MATSCI*, Aachen, Germany. Vol. I, pp. 235-244.

Larrinaga, P., C. Chastre, H. C. Biscaia and J. T. San-José (2014). "Experimental and numerical modeling of basalt textile reinforced mortar behaviour under uniaxial tensile stress." *Materials & Design* 55: 66-74.

Lúcio, V. e Chastre, C. (2015/2016). Folhas da disciplina de Reforço e Reparação de Estruturas. Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNL.

Lúcio, V. (2014/2015). Estruturas de Betão Armado I. Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNL.

## M

Machado, L. (2013). Caracterização de Calda Reforçada com Fibras Unidirecionais. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNL.

## R

Raoof, S. & Bournas, D. (2017). TRM versus FRP in Flexural Strengthening of RC Beams: Behaviour at High Temperatures. *Construction and Building Materials*. Vol. 154, pp 424–437.

Richard, R. & Abbot, B. (1975). Versatile Elastic-Plastic Stress-Strain Formula. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE 101, 4, pp.511-515.

## S

Santis, S. & Felice, G. (2014). Tensile Behaviour of Mortar-Based Composites for Externally Bonded Reinforcement Systems. *Composites Part B*. Vol 68, pp 401–413.

Simão, S. (2016). Estudo Experimental de Efeito de Confinamento em Provetes Cilíndricos por Encamisamento de Pequena Espessura em CRFU. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNL.

Structural Mag: <http://www.structuremag.org/?p=8643> [Acedido a 20 de Outubro de 2017]

## T

Tekieli, M., Santis, S., Felice, G., Kwiecien, A. & Roscini, F. (2016). Application of Digital Image Correlation to Composite Reinforcements Testing. *Composite Structures*, Vol. 160, pp. 670–688.

Teng, J., Yu, T. & Fernando, D. (2012). Strengthening of Steel Structures with Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Journal of Constructional Steel Research*. Elsevier, Vol. 78, pp. 131–143.

Tetta, Z. & Bournas, D. (2016). TRM vs FRP Jacketing in Shear Strengthening of Concrete Members Subjected to High Temperatures. *Composites Part B*, Vol. 106, pp 190-205.

Tetta, Z., Koutas, L. & Bournas, D. (2015). Textile-Reinforced Mortar (TRM) versus Fiber-Reinforced Polymers (FRP) in Shear Strengthening of Concrete Beams. *Composites Part B*, Vol. 77, pp 338-348.

Triantafillou, T. (2010). Chapter 5 - Textile-Reinforced Mortar (TRM) - A New Generation of Composite Materials as Alternative to Fibre-reinforced Polymers (FRP) for Strengthening and Seismic Retrofitting of Structures. *Composite Materials - A Vision for the Future*. Patras, Greece.

Triantafillou, T. & Papanicolau, C. (2005) Textile Reinforced Mortars (TRM) versus Fiber Reinforced Polymers (FRP) as Strengthening Materials of Concrete Structures. *Proceedings of the 7th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-7)*. Kansas City, Missouri, pp.99-117

## U

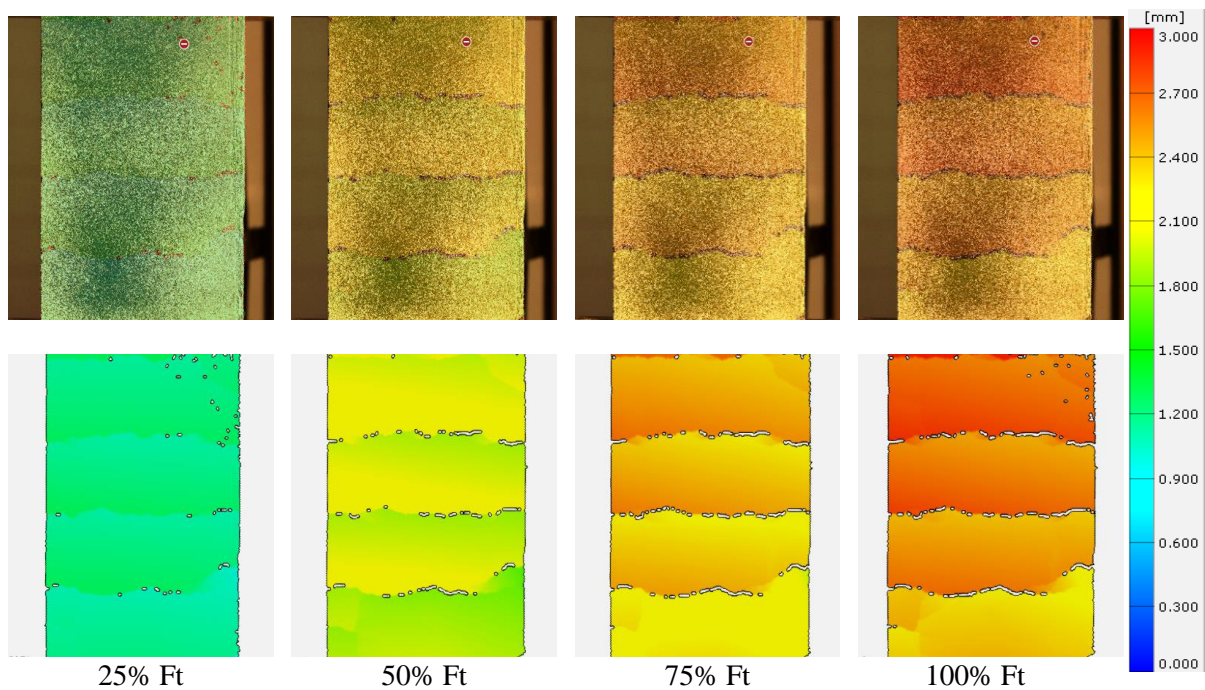
United States Geological Survey – USGS. (2017) Minerals Information, Minerals Yearbooks and Mineral Commodity Summaries for cement



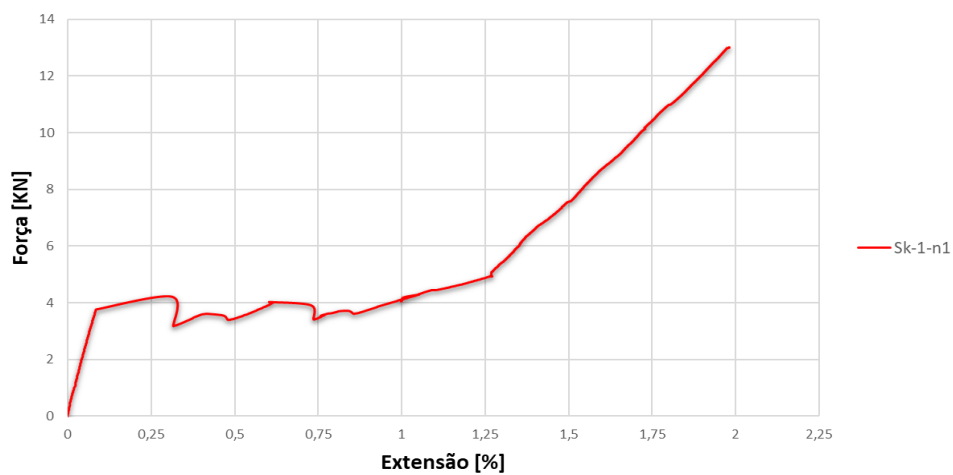
## ***Apêndice A***

De seguida apresentam-se as imagens da análise realizada aos provetes das séries Sk e SI obtidas a partir do software *GOM Correlate*. As imagens apresentadas representam o campo de deslocamentos obtido para diferentes percentagens da carga última aplicada (de 25%, 50%, 75% e 100%).

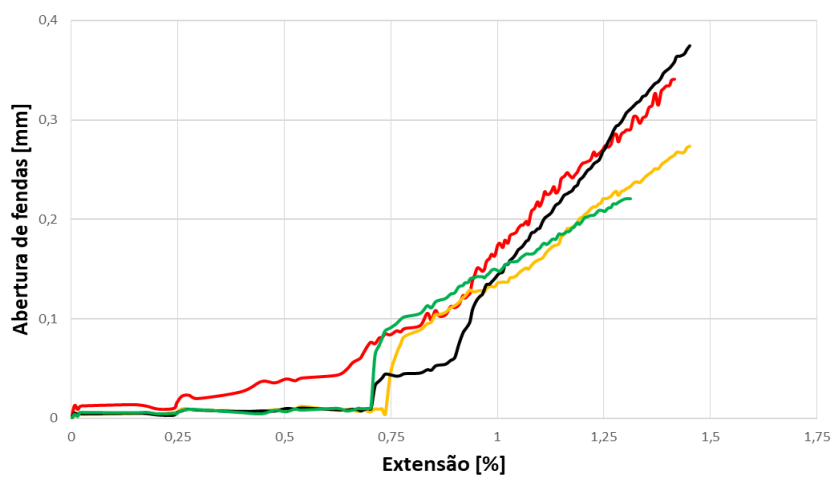
## Provete Sk-1-n1



(a)



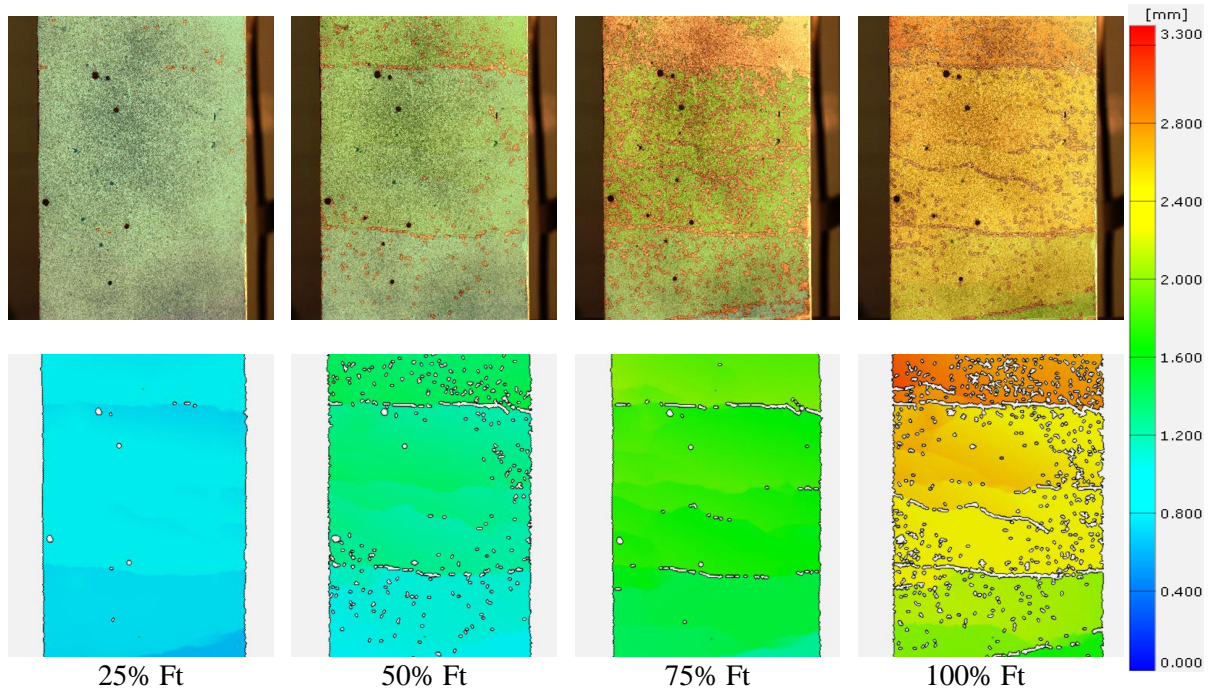
(b)



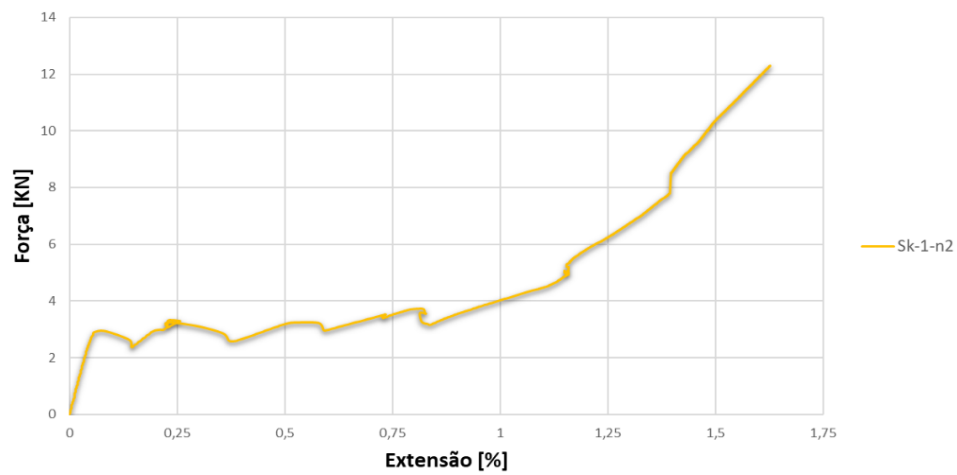
(c)

Figura 0.1 – (a) Campo de deslocamentos, (b) força-extensão e (c) abertura de fendas - provete Sk-1-n1

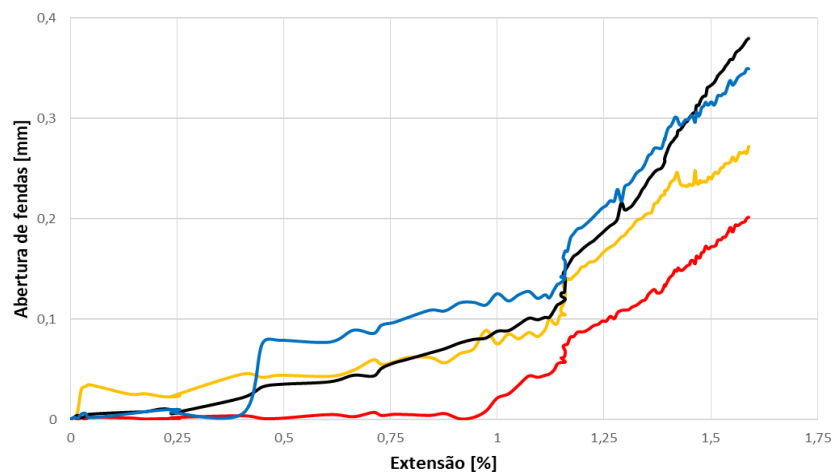
## Provete Sk-1-n2



(a)



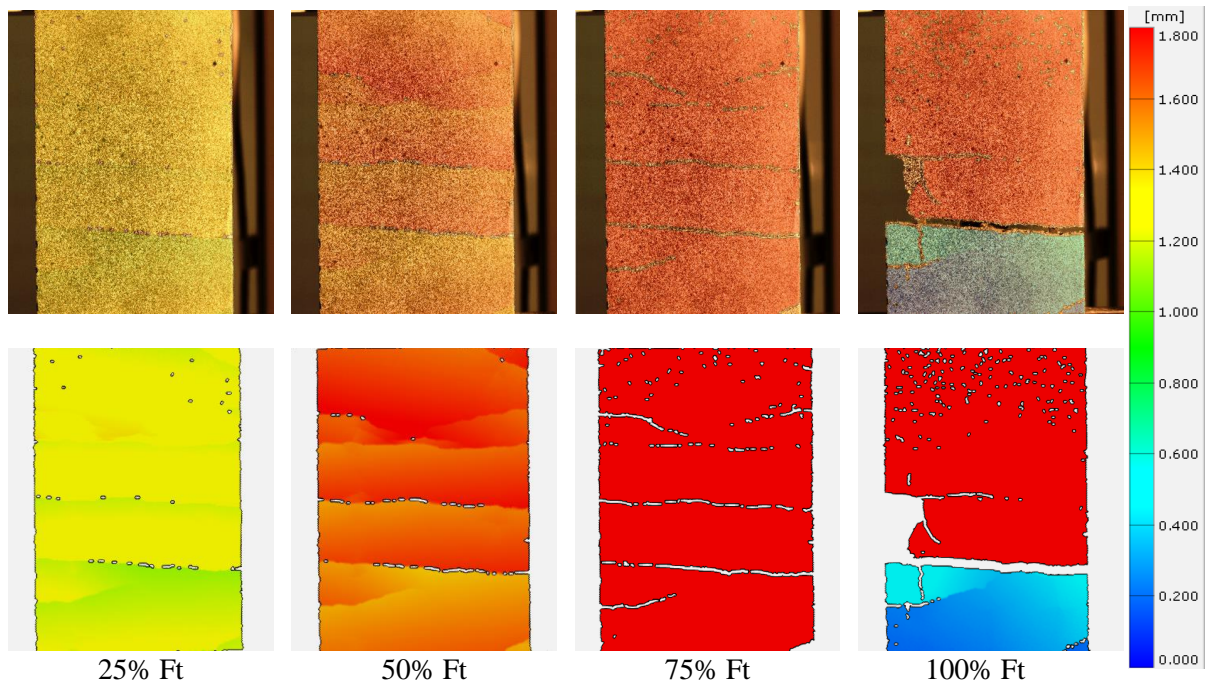
(b)



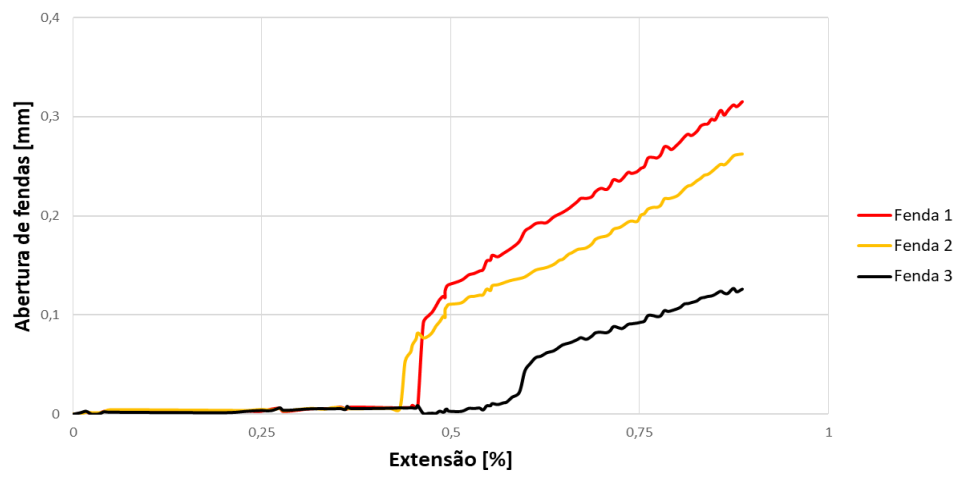
(c)

Figura 0.2 – (a) Campo de deslocamentos, (b) força-extensão e (c) abertura de fendas - provete Sk-1-n2

### Provete Sk-1-n4



(a)

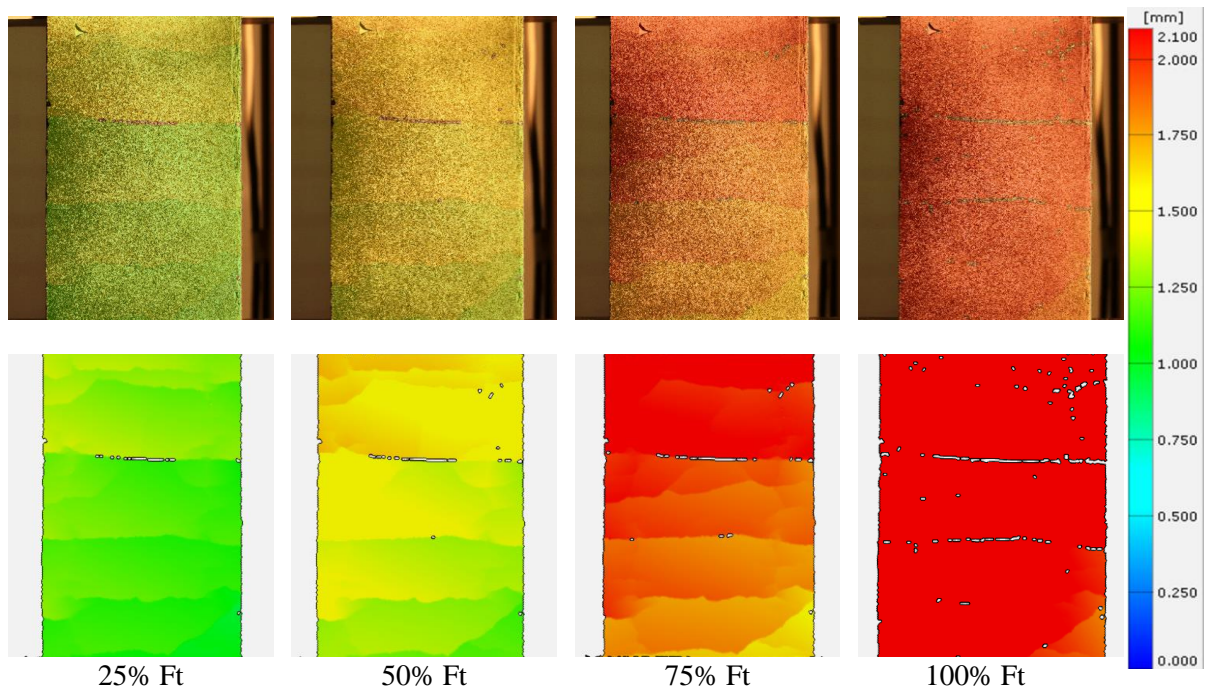


(b)

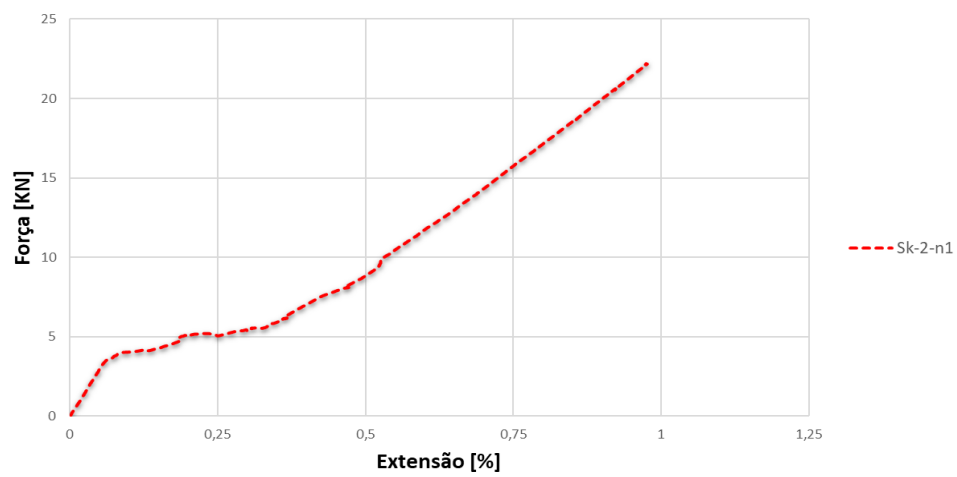
Figura 0.3 – (a) Campo de deslocamentos e (b) abertura de fendas - provete Sk-1-n4



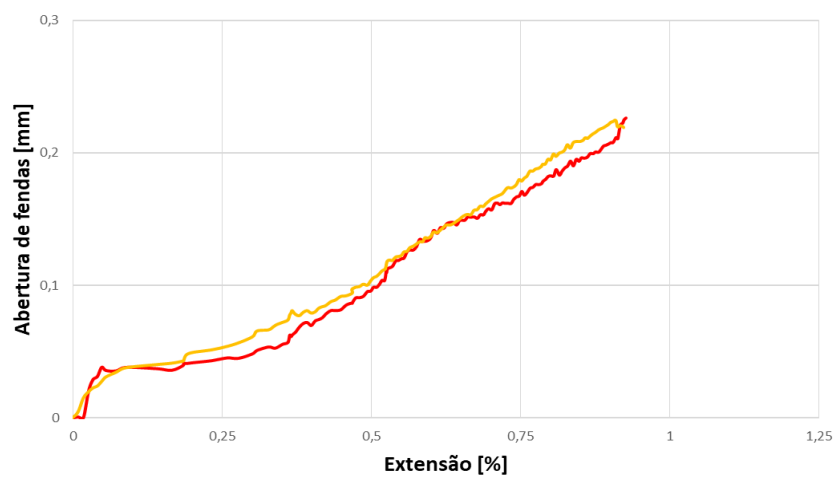
## Provete Sk-2-n1



(a)



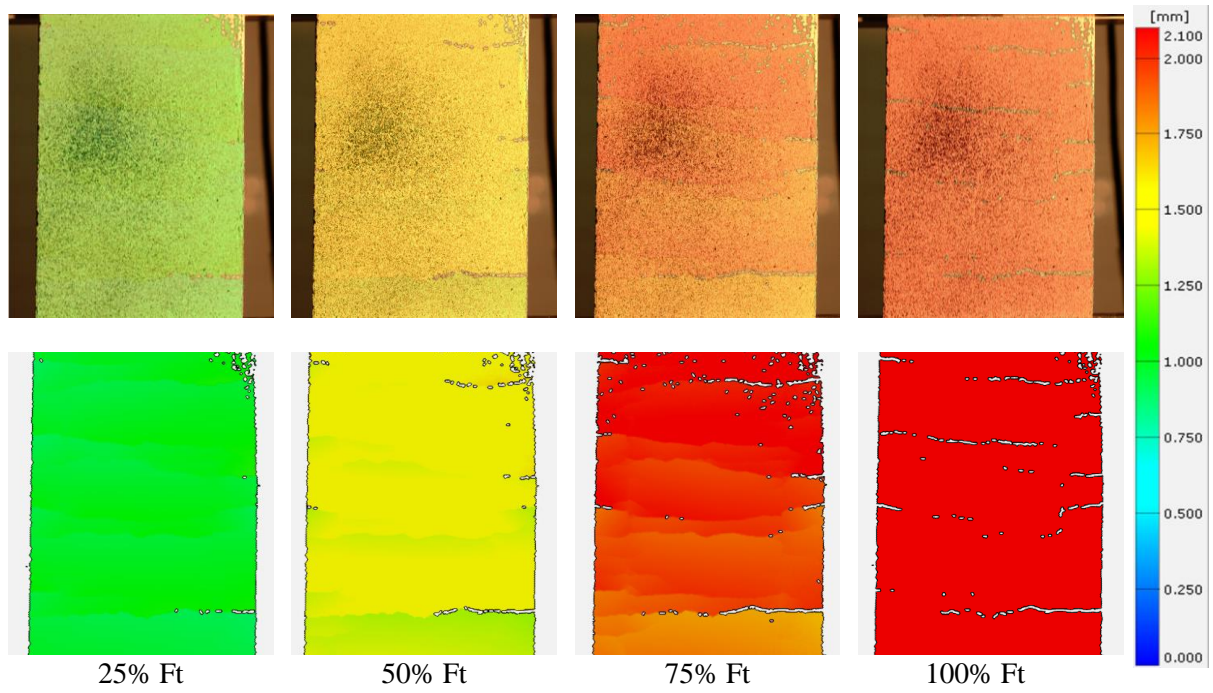
(b)



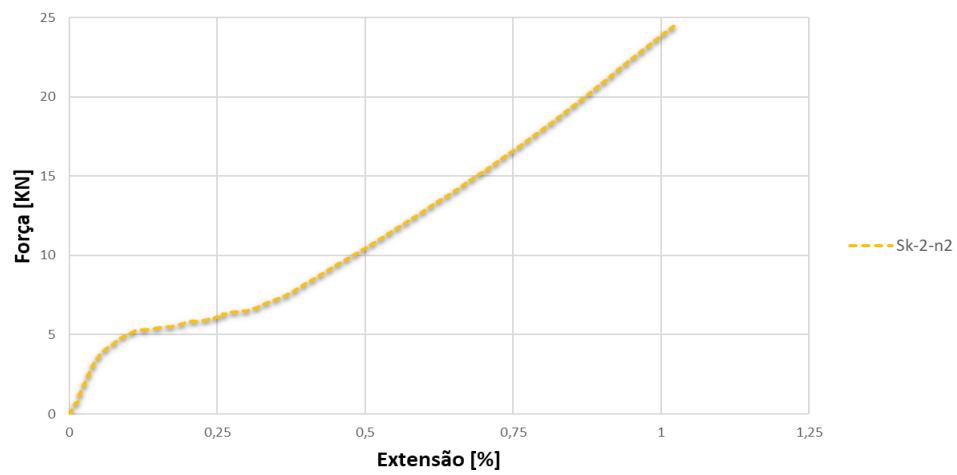
(c)

Figura 0.4 – (a) Campo de deslocamentos, (b) força-extensão e (c) abertura de fendas - provete Sk-2-n1

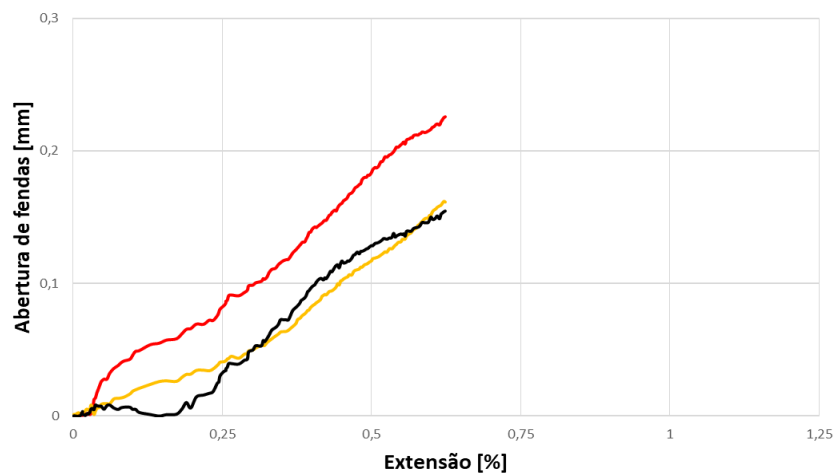
## Provete Sk-2-n2



(a)



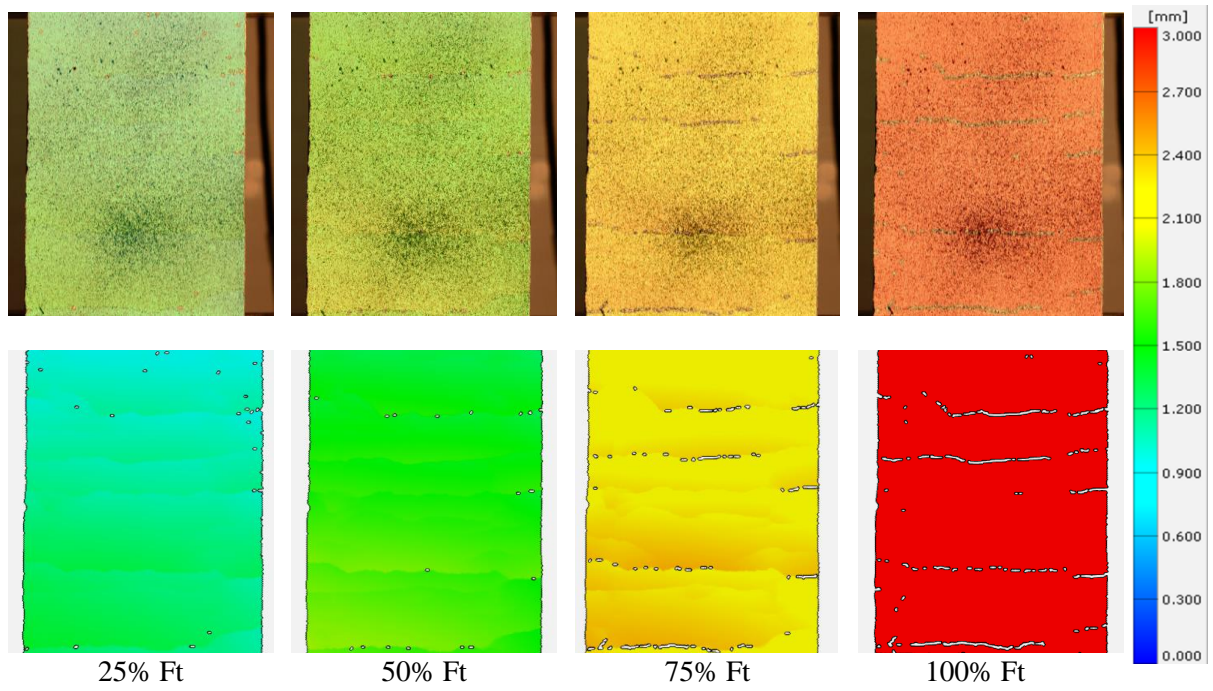
(b)



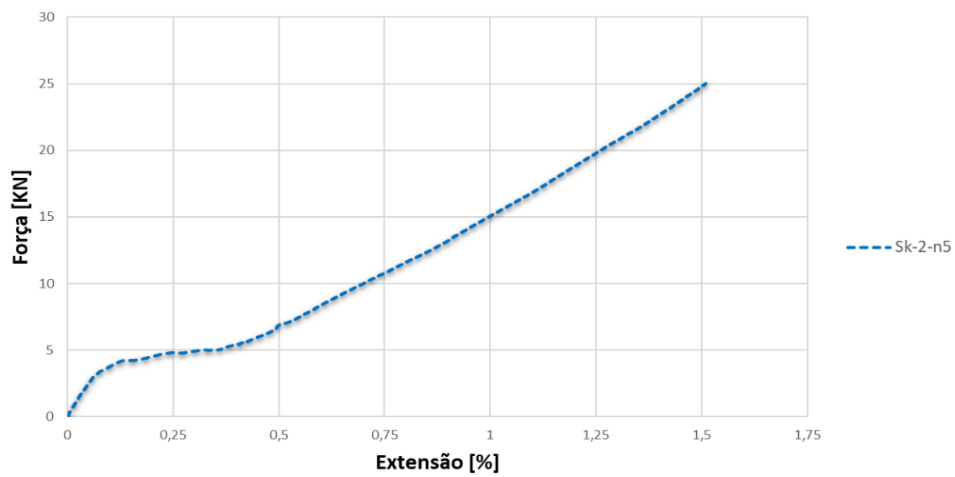
(c)

Figura 0.5 – (a) Campo de deslocamentos, (b) força-extensão e (c) abertura de fendas - provete Sk-2-n2

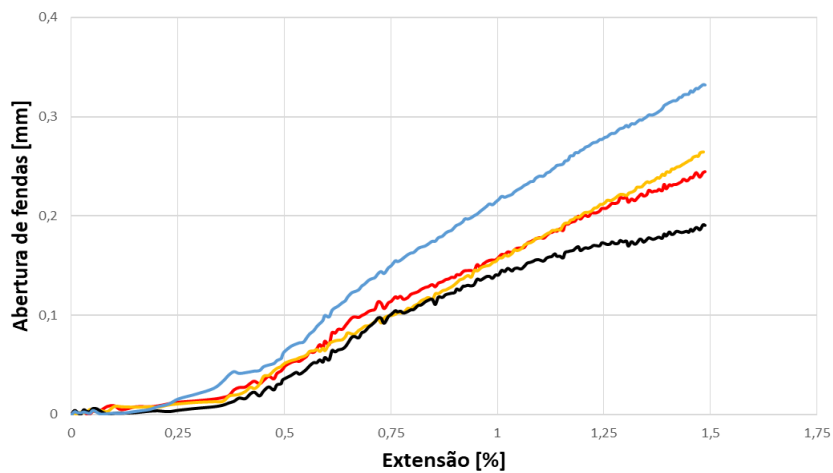
## Provete Sk-2-n5



(a)



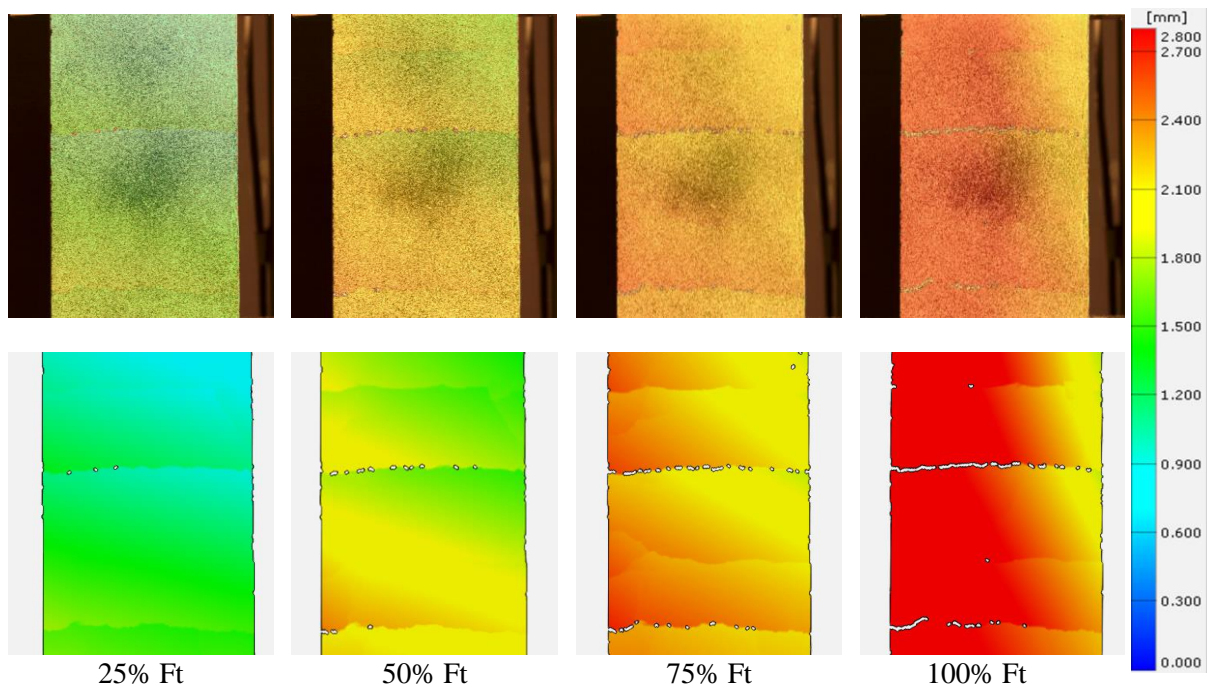
(b)



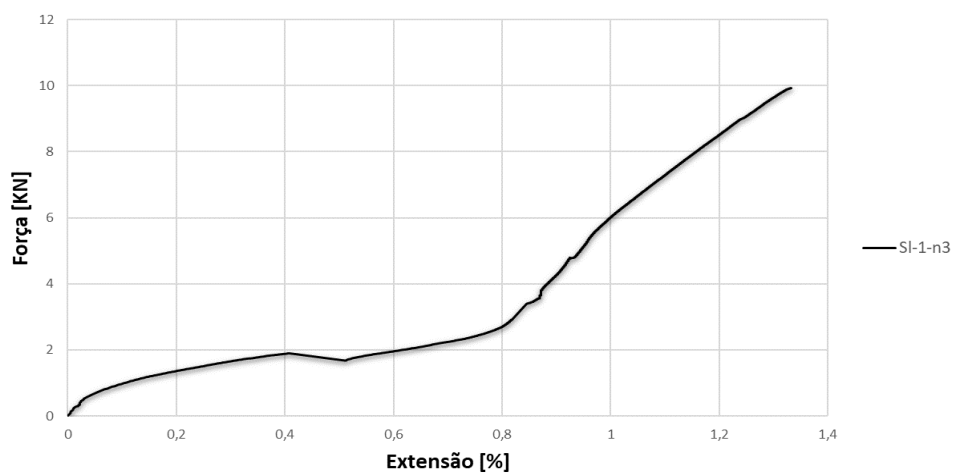
(c)

Figura 0.6 – (a) Campo de deslocamentos, (b) força-extensão e (c) abertura de fendas - provete Sk-2-n5

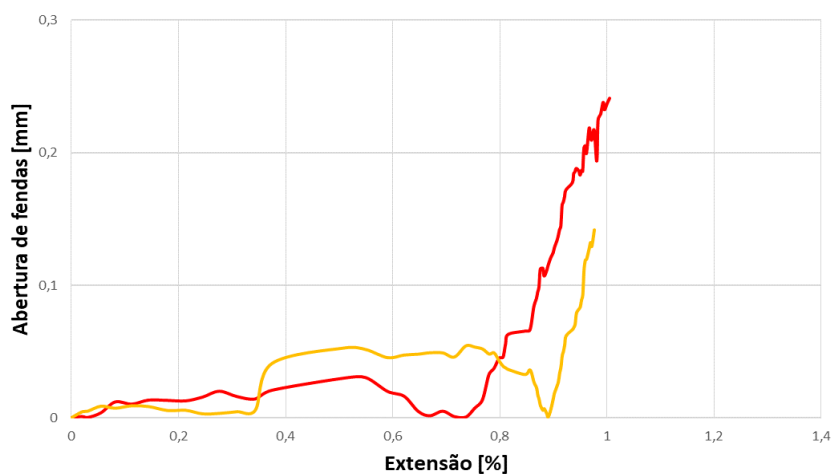
### Provete SI-1-n3



(a)



(b)

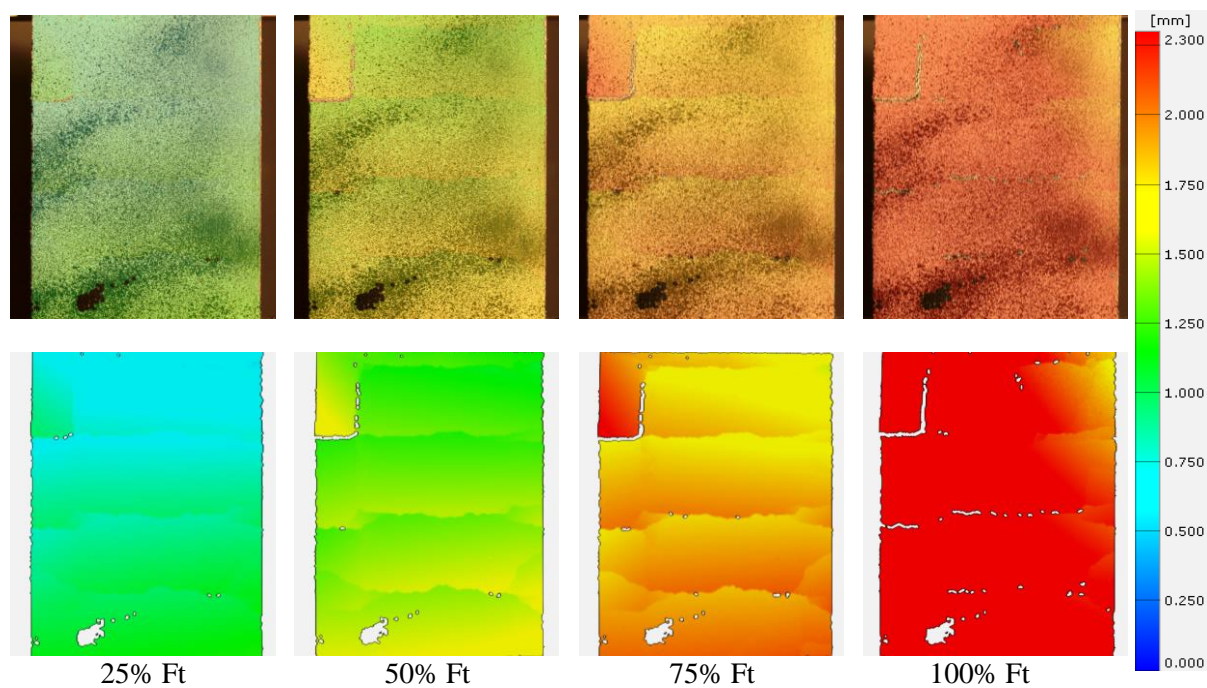


(c)

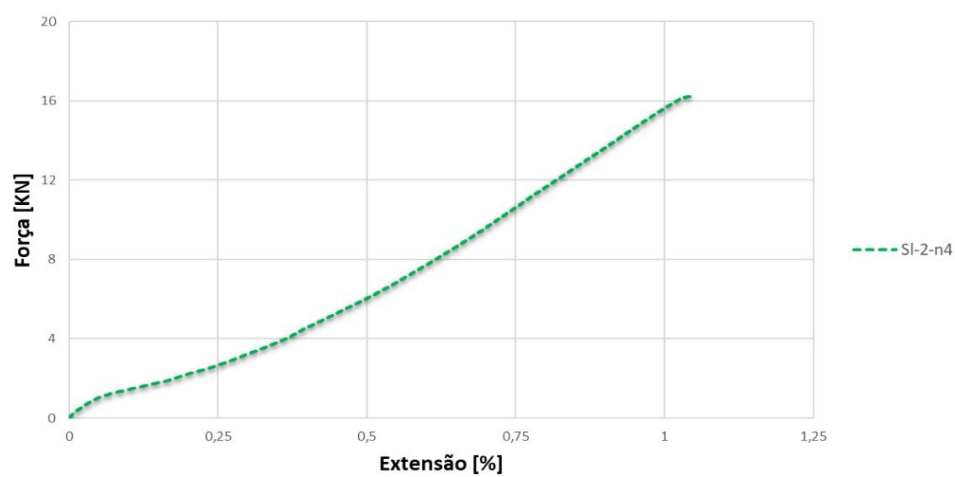
Figura 0.7 – (a) Campo de deslocamentos, (b) força-extensão e (c) abertura de fendas - provete SI-1-n3



### Provete SI-2-n4



(a)



(b)

Figura 0.8 – (a) Campo de deslocamentos e (b) força-extensão - provete SI-2-n4



## ***Apêndice B***

De seguida apresentam-se as imagens da análise realizada aos provetes das séries de CRFU obtidas a partir do software *GOM Correlate*. As imagens apresentadas representam o campo de deslocamentos obtido para diferentes percentagens da carga última aplicada (de 25%, 50%, 75% e 100%).



### Provete CRFU-1-n4

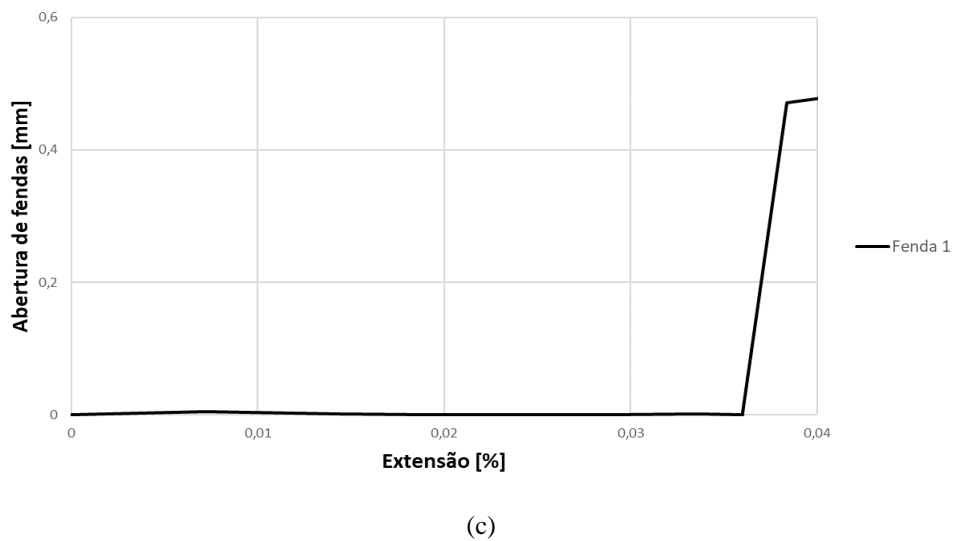
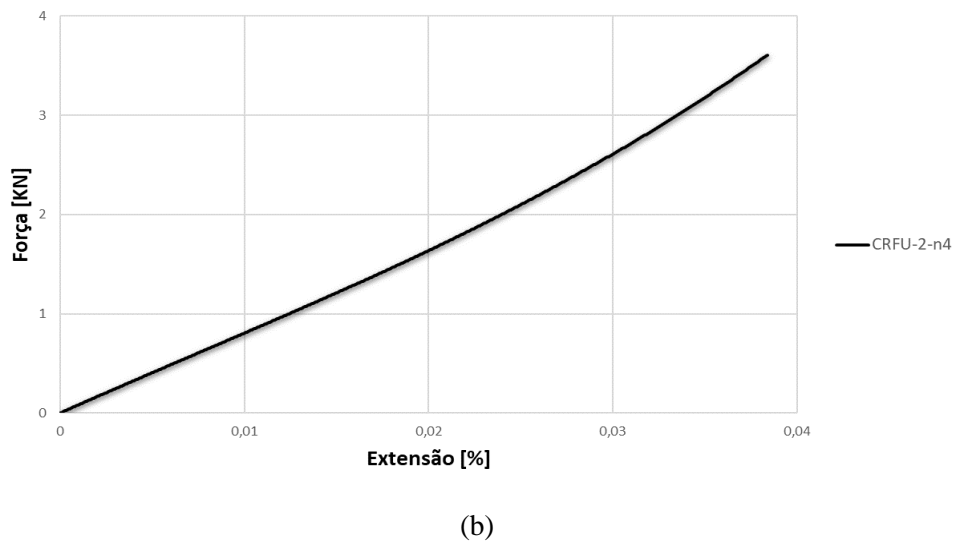
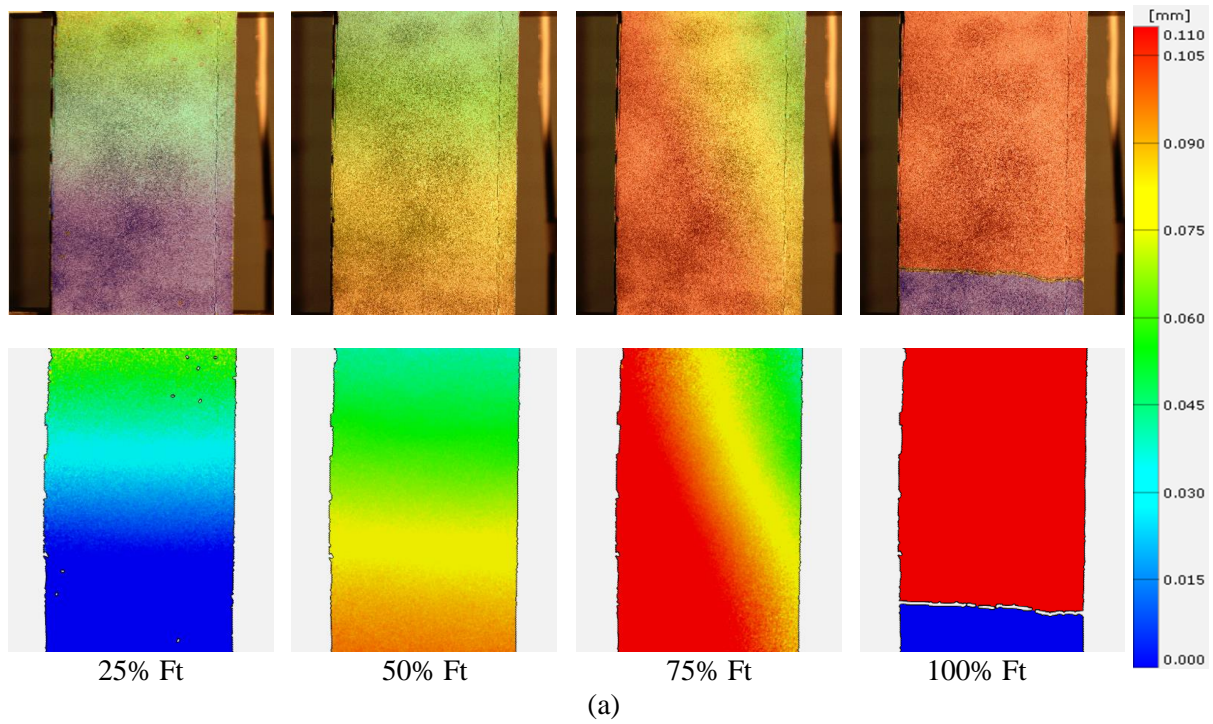
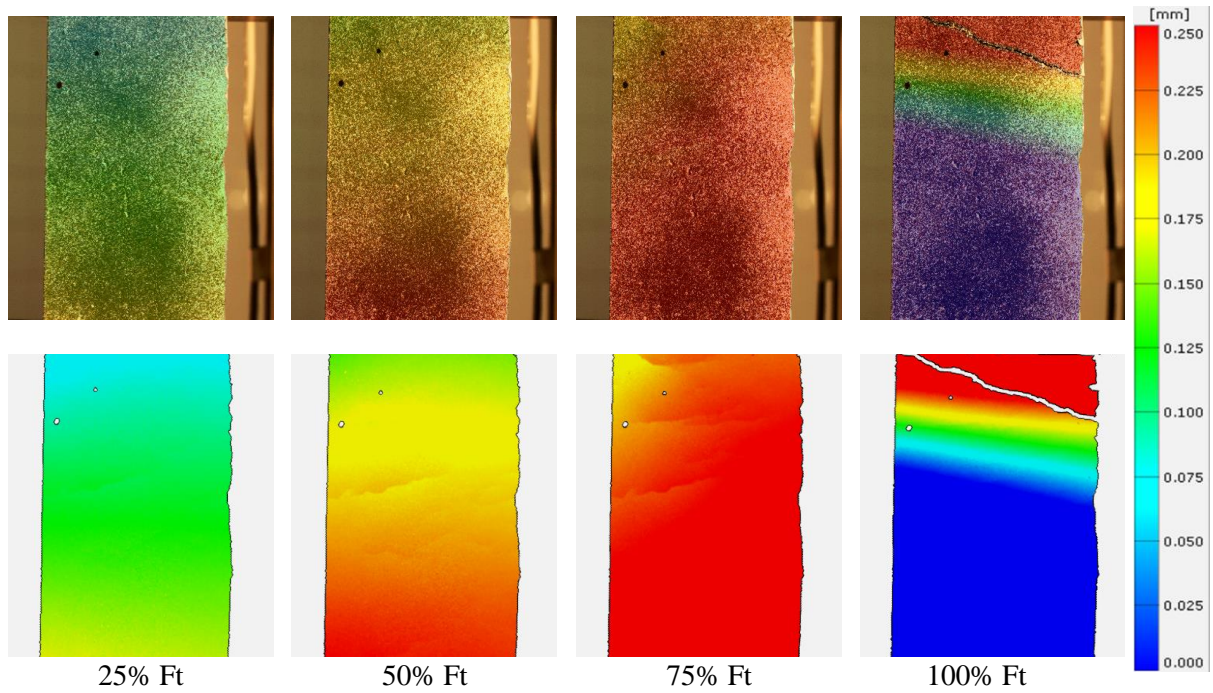
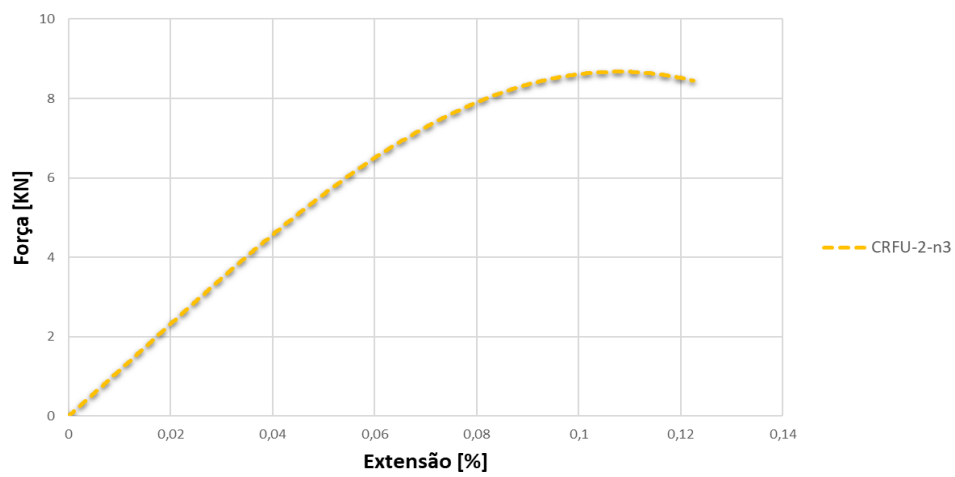


Figura 0.1 – (a) Campo de deslocamentos, (b) força-extensão e (c) abertura de fenda – CRFU-1-n4

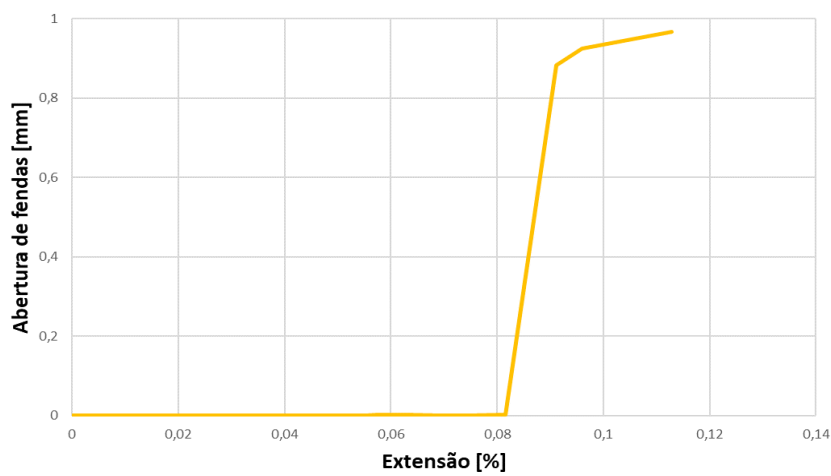
### Provete CRFU-2-n3



(a)



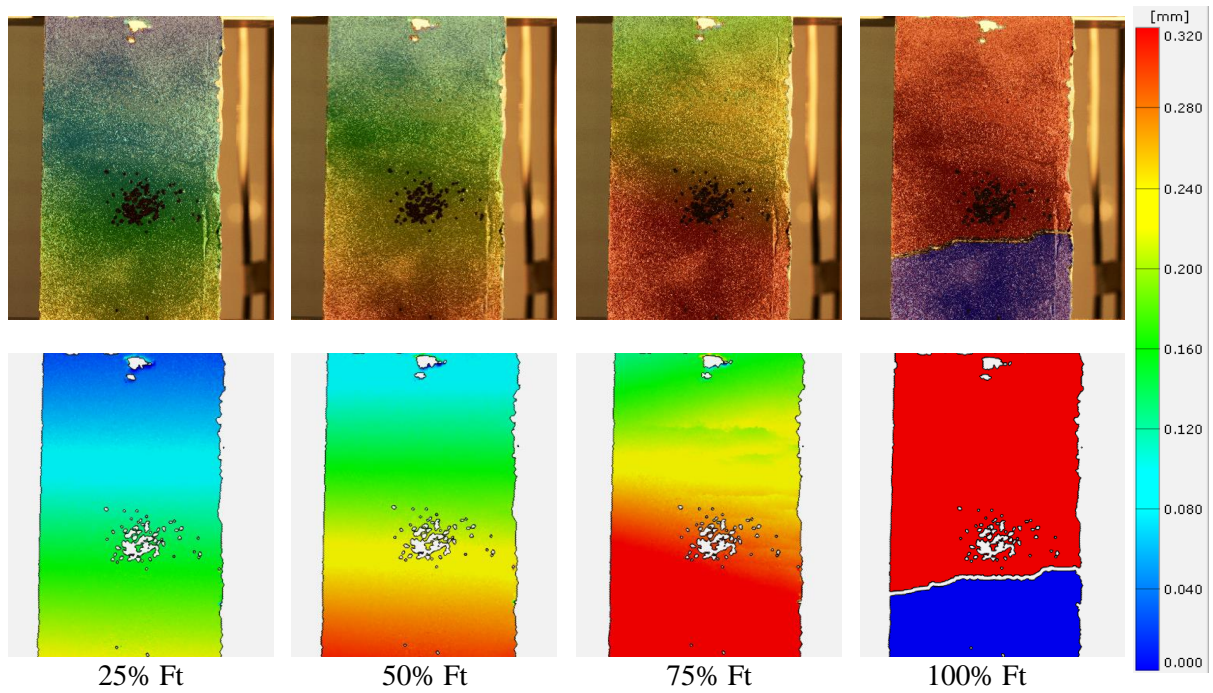
(b)



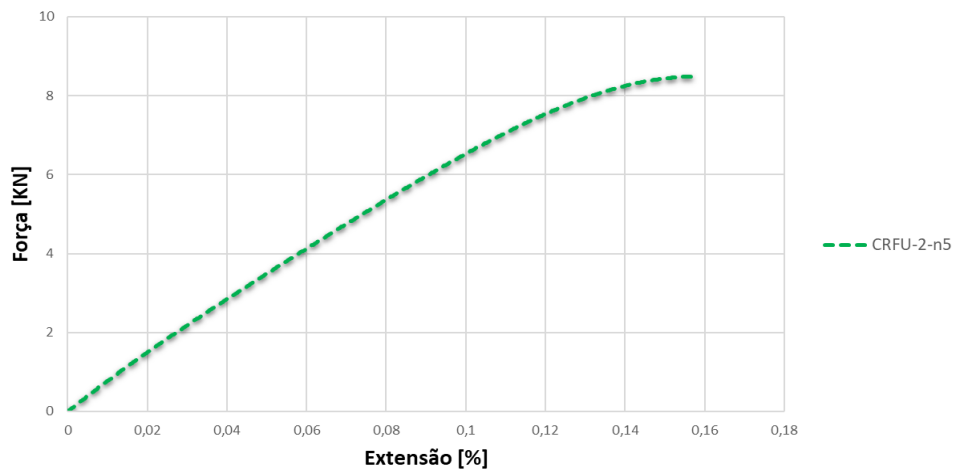
(c)

Figura 0.2 – (a) Campo de deslocamentos, (b) força-extensão e (c) abertura de fenda – CRFU-2-n3

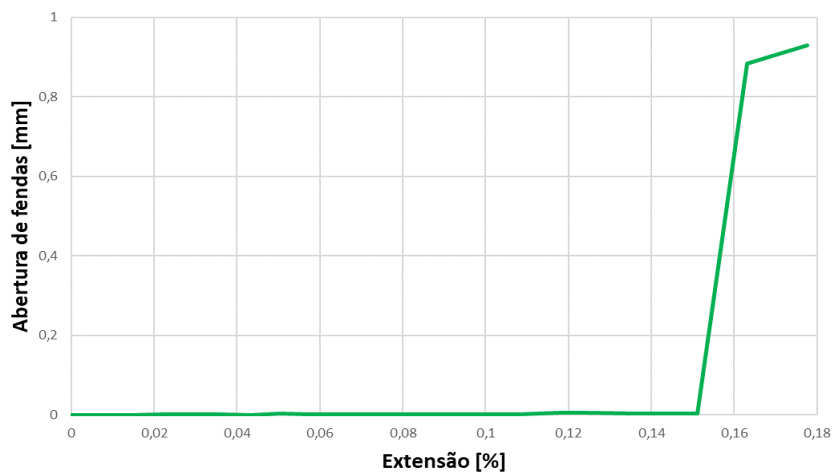
### Provete CRFU-2-n5



(a)



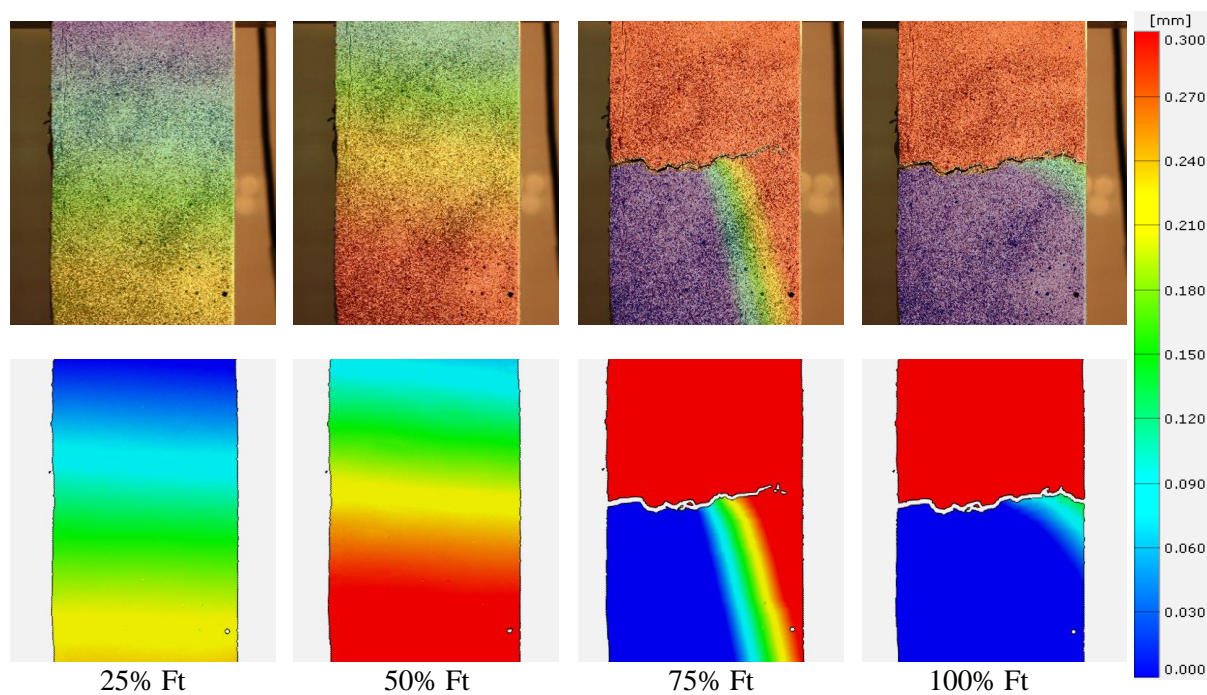
(b)



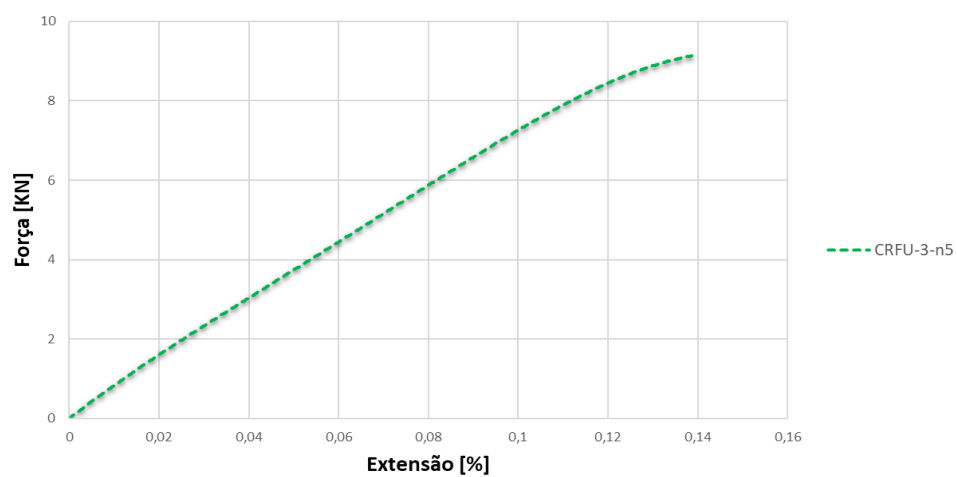
(c)

Figura 0.3 – (a) Campo de deslocamentos, (b) força-extensão e (c) abertura de fenda – CRFU-2-n5

### Provete CRFU-3-n5



(a)



(b)

Figura 0.4 – (a) Campo de deslocamentos e (b) força-extensão– CRFU-3-n5

